



João Miguel Palmeiro Marrazes

Automatização do Processo de Soldadura dos Aros das Portas das Torres Eólicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Vítorovna Guitiss
Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: Engenheiro José Manuel da Silva Clara, A. Silva
Matos, Energia, S.A.

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Virgílio António Cruz Machado
Arguentes: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Prof.^a Doutora Rosa Maria Marquito Marat-Mendes
Vogais: Prof.^a Doutora Helena Vítorovna Guitiss Navas
Licenciado José Manuel da Silva Clara



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2011

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta dissertação teve como orientadora a Professora Doutora Helena Navas (DEMI/FCT/UNL) e como co-orientador o Engenheiro José Clara (ASM). A ambos o meu agradecimento pela supervisão desta dissertação.

Agradeço à empresa A. Silva Matos, aos seus dirigentes e colaboradores, especialmente ao Sr. Marcelino, responsável de soldadura, pela disponibilidade.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Prof. Pamies Teixeira, ao Prof. António Gonçalves Coelho, ao Prof. Telmo Santos, ao Prof. António Gabriel dos Santos, ao Prof. Rui Martins, à Prof.^a Rosa Miranda e ao Prof. Alberto Martinho pela disponibilidade para esclarecerem as minhas dúvidas.

Resumo

No fabrico da torre metálica, realizado na empresa A. Silva Matos, Energia, S.A., a montagem do aro da porta é uma operação crítica do processo.

A operação de corte do perfil do aro da porta no corpo da torre eólica é feita por oxicorte manual, seguindo sempre a geometria de um molde.

A operação de soldadura dos aros das portas ao corpo da torre é feita através do processo de soldadura por Fios Fluxados (FCAW). A operação exige mão-de-obra altamente qualificada e dispendiosa e é bastante demorada (55 horas).

A necessidade de diminuir os tempos e os custos das operações de corte e soldadura dos aros das portas das torres eólicas levou à procura de alternativas ao trabalho manual.

A aplicação de um dispositivo automático de soldadura poderá permitir à empresa diminuir o tempo total do processo e reduzir o número de operadores de dois para um.

Estima-se que o dispositivo de soldadura projectado consiga diminuir a duração do processo de soldadura para cerca de 15 horas.

Termos chave

Torre Eólica, Soldadura, Corte, Automatização, Robot de Soldadura

Abstract

When manufacturing the steel tower at A. Silva Matos, Energia S.A. assembling the door frame is a crucial operation of the whole process.

The cutting of the geometry of the door frame in the wind tower is made with oxyfuel cutting, and it is always based on the geometry of a pattern.

The welding of the door frame to the body of the tower is made through flux-cored arc welding. This operation requires highly qualified and expensive labour and its duration is quite long (55 hours).

The need of reducing the time and cost of the welding and cutting of the door frames lead to a search for an alternative to manual labour.

Applying an automatic welding device may allow the company to reduce the total time of the process, as well as the number of operators from two to one.

It is estimated that the designed welding device can reduce the duration of the welding process to about 15 hours.

Keywords

Wind Tower, Welding, Cutting, Automation, Welding Robot

Índice de Matérias

1.	Introdução.....	1
1.1	Estrutura da dissertação.....	1
1.2	Objectivos da dissertação	1
1.3	Torres eólicas	2
1.3.1	Produção eólica	2
1.3.2	Tipos de torres	3
1.3.3	Componentes do sistema	6
1.4	Corte.....	7
1.4.1	Introdução aos processos de corte	7
1.4.2	Processo oxicorte.....	7
1.4.3	Processo de corte por plasma	8
1.4.4	Análise comparativa dos processos de corte	9
1.5	Soldadura.....	9
1.5.1	Introdução aos processos de soldadura.....	9
1.5.2	Terminologia e simbologia.....	11
1.5.3	Processo de soldadura MAG	12
1.5.4	Processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa.....	15
1.5.5	Processo de soldadura por arco submerso	16
1.5.6	Análise comparativa dos processos de soldadura.....	17
1.6	Dispositivos de soldadura.....	17
1.6.1	Introdução e visão geral.....	17
1.6.2	Vantagens da utilização de dispositivos de soldadura.....	17
1.6.3	Dispositivos existentes no mercado.....	18
2.	Caracterização do processo de produção.....	19
2.1	Perspectiva actual	20
2.2	Problemas detectados no processo	21
2.3	Soluções admissíveis.....	22
3.	Dispositivo de soldadura	23
3.1	Requisitos do sistema	23
3.2	Descrição da solução	23
3.3	Levantamento dos componentes existentes no mercado	29

3.4	Escolha dos componentes a adquirir	30
3.4.1	Rodas	30
3.4.2	Moto-redutor e controlador	32
3.4.3	Rodas dentadas	36
3.4.4	Chumaceiras de rolamento	38
3.4.5	Chumaceiras lineares	39
3.4.6	Mola de gás	40
3.4.7	Molas de compressão helicoidais	41
3.4.8	Molas de torção	43
3.4.9	Esferas	49
3.4.10	Casquilhos	50
3.4.11	Elementos de fixação	50
3.4.12	Fusos de movimento e porcas	51
3.4.13	Eixo de guiamento	52
3.5	Escolha dos materiais para as peças a construir	53
3.6	Dimensionamento das peças construídas	53
3.6.1	Chassis	54
3.6.2	Chapa de acoplamento da mola de gás à chumaceira linear e suportes da tocha	56
3.6.3	Elementos de suporte das molas helicoidais de compressão	58
3.6.4	Chapa de apoio da roda de translação	60
3.6.5	Veios de união dos triângulos de suspensão	61
3.6.6	Triângulos de suspensão	62
3.6.7	Protector de rodas dentadas	63
3.6.8	Veio de transmissão	63
3.6.9	Junta	64
3.6.10	Apoios das molas de torção	64
3.6.11	Espaçador do moto-redutor	64
3.7	Análise do comportamento do dispositivo	64
4.	Alternativas ao dispositivo de soldadura	67
4.1	Requisitos das consultas	67
4.2	Hipóteses sugeridas	67

4.3	Descrição do processo de consulta às empresas	68
4.4	Descrição das propostas recebidas	69
5.	Escolha da solução	73
5.1	Matriz de decisão.....	73
5.1.1	Árvore modelo.....	74
5.1.2	Árvore de objectivos	74
5.1.3	Cálculo dos factores de ponderação	74
5.1.4	Matriz de decisão.....	75
5.1.5	Análise da matriz de decisão	75
6.	Conclusões	77
	Bibliografia.....	79
	Anexos.....	81

Índice de Figuras

Figura 1.1: Torre entrelaçada [2].....	3
Figura 1.2: Torre tubular [3].....	4
Figura 1.3: Torres eólicas <i>offshore</i> alicerçadas no fundo [5].	5
Figura 1.4: Torres eólicas <i>offshore</i> flutuantes, protótipo construído na A. Silva Matos.	5
Figura 1.5: Esquema de aerogerador com caixa multiplicadora [6].....	6
Figura 1.17: Oxicorte com 3 bicos [12].....	7
Figura 1.18: Os quatro estados de matéria [15].....	8
Figura 1.6: Classificação de processos de soldadura por fusão, com processos de soldadura utilizados em evidência [7]	10
Figura 1.7: Tipos de chanfros [7]	11
Figura 1.8: Tipos de juntas [7]	11
Figura 1.9: Posições de soldadura [7].....	12
Figura 1.10: Componentes intervenientes no processo MAG [8]	12
Figura 1.11: Terminologia do processo MAG [7].....	13
Figura 1.12: Transferência em curto-circuito[7]	14
Figura 1.13: Transferência em spray com elevada intensidade de corrente[7]	14
Figura 1.14: Processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa[7]	15
Figura 1.15: Comparação dos eléctrodos do processo MAG (GMAW) com os eléctrodos do processo fios fluxados (FCAW).....	16
Figura 1.16: Princípio do processo de soldadura por arco submerso[7]	16
Figura 1.19: Sistema de soldadura SAW automatizada da ESAB [12].....	18
Figura 1.20: Sistema de soldadura automatizada Frametrac da ESAB [12]	18
Figura 2.1: Aro da porta colocado na torre metálica (excerto do desenho de uma torre metálica [18])	19
Figura 2.2: Junta de soldadura na união entre o aro da porta e a torre eólica [18]	20
Figura 3.1: Dispositivo de soldadura colocado no aro da porta	23
Figura 3.2: Montagem do chassis do dispositivo com as rodas colocadas.....	24
Figura 3.3: Dispositivo com rodas e mecanismo tipo suspensão	25
Figura 3.4: Tocha colocada entre as duas rodas	26
Figura 3.5: Apresentação do funcionamento das esferas	26
Figura 3.6: Furos passantes para fixação das esferas	27
Figura 3.7: Sistema de ajuste de rotação e movimento axial da tocha	27
Figura 3.8: Moto-redutor e rodas dentadas.....	28
Figura 3.9: Roda Fairlane RR-215-60-EX500[20].....	31
Figura 3.10: Roda Fairlane RR-215-60-C[20]	31

Figura 3.11: Roda Fairlane RR-215-60-B[20]	31
Figura 3.12: Roda Shepherd PRE16 CO-3E[21].....	32
Figura 3.13: Moto-redutor Bodine Electric N1098[22]	33
Figura 3.14: Controlador 1865 da Bodine Electric [22].....	34
Figura 3.15: Roda dentada [23].....	36
Figura 3.16: Acoplamento das rodas dentadas ao veio [23].....	38
Figura 3.17: Chumaceira de rolamento escolhida[24].....	38
Figura 3.18: Análise de vida útil das chumaceiras de rolamento calculada em Solidworks 2010	39
Figura 3.19: Chumaceira linear THK SHS15-C [25].....	39
Figura 3.20: Representação da diferença de cotas ao longo do aro da porta devido à conicidade da torre metálica [18].....	40
Figura 3.21: Mola de gás Bansbach[26].....	41
Figura 3.22: Posicionamento das molas de ajuste da tocha.....	42
Figura 3.23: Diagrama de corpo livre da suspensão.....	44
Figura 3.24: Diagrama de corpo livre do dispositivo	46
Figura 3.25: Posicionamento dos tirantes de suspensão em relação à horizontal	48
Figura 3.26: Posicionamento das molas no curso pretendido	49
Figura 3.27: Afinador roscado DIN 6303 [31].....	52
Figura 3.28: Eixo de guiamento escolhido [23]	52
Figura 3.29: Parte exterior do chassis.....	54
Figura 3.30: Parte interior do chassis	55
Figura 3.31: Parte superior do chassis.....	55
Figura 3.32: Espaçador do chassis	55
Figura 3.33:Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 1	56
Figura 3.34: Deslocamentos na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha. 56	
Figura 3.35: Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 2	57
Figura 3.36: Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 3	58
Figura 3.37: Mecanismos de ajuste do posicionamento da tocha.....	58
Figura 3.38: Distribuição de tensões e deslocamento no elemento 1 de suporte da tocha.....	59
Figura 3.39: Deslocamento da chapa de apoio à roda de translação	60
Figura 3.40: Distribuição de tensões na chapa de apoio da roda de translação.....	60
Figura 3.41: Distribuição de tensões e deslocamento nos veios da “suspensão”	61
Figura 3.42: Distribuição de tensões proveniente do esforço para afastar a roda do aro da porta	62
Figura 3.43: Distribuição de tensões nos “triângulos de suspensão”	62

Figura 3.44: Distribuição de tensões ao longo do veio de transmissão	63
Figura 3.45: Distribuição de tensões na junta	64
Figura 4.1: Robot montado num pórtico [33].....	67
Figura 4.2: Robot aplicado numa unidade de movimento linear [33]	68
Figura 4.3: Solução nº1 apresentada pela ASB, <i>Solutions</i> [34].....	69
Figura 4.4: Solução nº2 apresentada pela ASB, <i>Solutions</i> [34].....	70
Figura 4.5: Promotech MCM 4000 [35].....	70
Figura 4.6: Promotech MCM 4000 colocado na torre metálica [35].....	71

Índice de Tabelas

Tabela 1.1: Produção eólica e consumo total [1]	3
Tabela 1.2: Aplicações dos processos de soldadura [6]	10
Tabela 1.3: Comparação dos processos de soldadura	17
Tabela 2.1: Parâmetros de soldadura utilizados [18].....	21
Tabela 3.1: Componentes a adquirir.....	30
Tabela 3.2: Carga admissível para as chumaceiras das rodas Fairlane, em função da velocidade de rotação [20]	30
Tabela 3.3: Especificações do moto-redutor N1098[22].....	33
Tabela 3.4: Especificações do controlador 1865[22]	34
Tabela 3.5: Especificações das rodas dentadas escolhidas[23]	37
Tabela 3.6: Momentos suportados pela chumaceira linear [25]	40
Tabela 3.7: Dimensões da montagem do aro na torre (mm) [18]	41
Tabela 3.8: Características da mola helicoidal de compressão 1 [27]	42
Tabela 3.9: Características da mola helicoidal de compressão 2	43
Tabela 3.10: Características das molas de torção[28]	47
Tabela 3.11: Variação dos momentos aplicados ao longo do curso da suspensão	48
Tabela 3.12: Variação das forças aplicadas ao longo do curso da suspensão	48
Tabela 3.13: Características da esfera [29].....	49
Tabela 3.14: Características dos casquilhos escolhidos [23].....	50
Tabela 3.15: Cavilhas utilizadas na montagem do dispositivo [29][30]	50
Tabela 3.16: Chaveta utilizada na montagem do dispositivo [29][30].....	51
Tabela 3.17: Parafusos, anilhas e porcas utilizados na montagem do dispositivo [29][30]	51
Tabela 5.1: Especificações das alternativas ao dispositivo projectado	73
Tabela 5.2: Árvore modelo.....	74
Tabela 5.3: Árvore de objectivos	74
Tabela 5.4: Matriz de decisão.....	75

Simbologia e Notações

F	Força resultante, N
F_a	Força na direcção a, N
$F_{a_{estático}}$	Força de atrito estático, N
$F_{a_{rolamento}}$	Força de atrito de rolamento, N
F_{a_2}	Força de atrito entre a roda de tracção e o aro da porta, N
F_{a_3}	Força de atrito entre as rodas D e E e o aro da porta, N
F_b	Força na direcção b, N
F_{elast}	Força da mola helicoidal, N
F_{max}	Força máxima da mola, N
F_{min}	Força mínima da mola, N
FM_1	Força provocada pelo momento M1, N
Fm_1	Força da mola de gás (reacção ascendente), N
FM_2	Força provocada pelo momento M2, N
Fm_2	Força da mola de gás (reacção descendente), N
FS	Coefficiente de segurança total
$FS1$	Coefficiente de segurança do material
$FS2$	Coefficiente de segurança relativo ao carregamento
F_{Tpeak}	Força referente ao Momento de rotação máximo do moto-reductor, N
F_{μ}	Força de atrito da roda no aro da porta, N
K	Constante de elasticidade da mola, N/mm
K_t	Constante de elasticidade da mola de torção, N.mm/°
L	Distância a que a força é aplicada (braço), mm
L_{mola}	Curso mínimo necessário da mola de gás, mm
L_1	Braço onde é medida a força FM1, mm
L_2	Braço onde é medida a força FM2, mm
M	Momento da força resultante, N.mm
M_a	Momento aplicado na direcção a, N.mm
M_b	Momento aplicado na direcção b, N.mm
M_n	Momento de rotação máximo, N.mm
M_1	Momento provocado pela mola de torção 1, N.mm
M_2	Momento provocado pela mola de torção 2, N.mm
N	Reacção normal, N
N_1	Reacção do aro à roda de tracção, N
N_3	Reacção do aro à força das rodas D e E, N

$ O102 $	Distância entre eixos, mm
P	Peso do dispositivo, N
Per	Perímetro, mm
R_x	Componente em x da reacção provocado pelo sistema de suspensão, N
R_y	Componente em y da reacção provocado pelo sistema de suspensão, N
R_1	Reacção 1, N
R_2	Reacção 2, N
T	Momento de rotação nominal do moto-reductor, N.mm
$T_{arranque}$	Momento de rotação mínimo para o dispositivo arrancar, N.mm
T_{peak}	Momento de rotação máximo do moto-reductor, N.mm
Z_1	Número de dentes da roda motora
Z_2	Número de dentes da roda movida
a	Aceleração tangencial, m/s ²
dp_1	Diâmetro primitivo da roda dentada motora, mm
dp_2	Diâmetro primitivo da roda dentada movida, mm
i	Relação de transmissão
m	Massa, kg
m_{rd}	Módulo da roda dentada
n	Velocidade de rotação da roda de tracção, min ⁻¹
r_{roda}	Raio da roda de tracção, mm
t	Espessura da torre, mm
t_1	Espessura do aro da porta, mm
v	Velocidade linear do dispositivo, m/s
Δx	Alongamento da mola de compressão, mm
Δt	Intervalo de tempo, s
α	Aceleração angular, rad/s ²
θ	Ângulo entre os tirantes e a horizontal, °
$\mu_{estático}$	Coeficiente de atrito estático
$\mu_{rolamento}$	Coeficiente de atrito de rolamento
σ_{adm}	Tensão admissível, N/mm ²
σ_c	Tensão de cedência do material, N/mm ²
$\varnothing A$	Diâmetro da roda de tracção, mm
φ	Ângulo de rotação máximo da mola de torção, °
ω_f	Velocidade angular final, rad/s
ω_i	Velocidade angular inicial, rad/s

Abreviaturas

ASM	A. Silva Matos, Energia, S.A.
FCAW	<i>Flux-cored arc welding</i>
GMAW	<i>Gas metal arc welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
SAW	<i>Submerged arc welding</i>
ESAB	<i>Elektriska SvetsningsAktieBolaget</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

1.Introdução

1.1 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro a “introdução” e o ultimo as “conclusões”.

O capítulo 1 introduz o tema da dissertação e apresenta um estado de arte sobre os processos utilizados na montagem do aro da porta, tanto actualmente na versão manual, como na versão automatizada. Neste capítulo introduzem-se também os temas das torres eólicas e dos dispositivos de soldadura.

O capítulo 2 é dedicado à caracterização do processo de montagem dos aros das portas nas torres metálicas, primeiro com uma descrição pormenorizada do processo de produção actual, de seguida enumerando os problemas detectados e posteriormente as soluções encontradas para resolver esses problemas.

O capítulo 3 apresenta o dispositivo de soldadura projectado, desde os requisitos exigidos ao seu funcionamento até ao dimensionamento exaustivo, tanto ao nível da escolha de peças a adquirir como ao nível do dimensionamento de peças a construir.

O capítulo 4 mostra as alternativas ao dispositivo projectado. Neste capítulo descrevem-se os requisitos das propostas requeridas às empresas e as soluções apresentadas pelas mesmas empresas

De seguida, no capítulo 5, é feita a escolha da melhor solução com vista à automatização do processo de montagem dos aros das portas nas torres metálicas.

Por fim, o capítulo 6 apresenta um resumo do trabalho apresentado juntamente com as conclusões dos resultados obtidos.

1.2 Objectivos da dissertação

A montagem do aro da porta é uma operação crítica do processo de fabrico da torre metálica. O aro da porta é um componente importante na estrutura da torre metálica, conferindo a esta resistência à flexão.

A necessidade de diminuir os tempos e os custos das operações de corte e soldadura dos aros das portas das torres eólicas levou à procura de alternativas ao trabalho manual.

É necessário obter uma solução com vista à automatização dos processos de soldadura dos aros das portas às torres metálicas e se possível melhorar os processos anteriores (reconhecimento de coordenadas, corte e chanfragem do perfil do aro da porta na torre metálica e preparação de junta) e

posteriores (limpeza do cordão e verificação da qualidade do cordão de soldadura) ao processo de soldadura.

Esta dissertação de mestrado tem como principal objectivo obter uma solução para o problema enunciado pela empresa A. Silva Matos, Energia, S.A.

Para se obter uma solução com vista à automatização dos processos de soldadura, analisou-se o processo de produção actual, com o objectivo de detectar os pontos fracos, para de seguida encontrar soluções que tragam mais-valias ao processo.

A aplicação de um dispositivo automático de soldadura poderá permitir à empresa diminuir a duração do processo e reduzir o número de operadores de dois para um. No entanto, continua a ser necessária mão-de-obra especializada para regular os diversos parâmetros do processo.

Em alternativa ao dispositivo de soldadura, considerou-se a hipótese de solicitar propostas a empresas de soluções robotizadas ou mecanizadas, para a execução das duas operações: corte e soldadura. Numa primeira operação, seria feito o levantamento da geometria real de cada aro de porta e seguidamente o corte no corpo da torre, baseado nesse levantamento. Numa segunda operação, realizava-se a soldadura do aro da porta.

1.3 Torres eólicas

Neste subcapítulo será apresentada a relevância da produção eólica na produção de energia em Portugal. Serão descritos os tipos de torres eólicas e será dada a conhecer a nomenclatura dos componentes do sistema.

1.3.1 Produção eólica

A energia do vento é aproveitada pelo homem desde há muitos milénios atrás.

Quando as civilizações antigas procuraram alternativas à força dos animais e dos escravos, começaram a utilizar a água e o vento como fontes de energia naturais. A energia do vento foi assim utilizada para mover moinhos, para a irrigação de terrenos ou para a deslocação de barcos à vela, ao longo dos tempos até à invenção da máquina a vapor e da electricidade.

No século XIX fizeram-se as primeiras tentativas para a produção de energia eléctrica utilizando a energia do vento, mas é em finais do século XX que a produção de energia eléctrica em grande escala tem o seu início, com a instalação dos primeiros parques eólicos. Se bem que os EUA tivessem sido pioneiros na utilização da energia eólica foi na Europa que se assistiu a um desenvolvimento tecnológico significativo desta indústria a partir do início dos anos 90, com particular relevo na Alemanha e Dinamarca.

Hoje a Europa é líder mundial quer no fabrico de turbinas eólicas quer em termos de potência eólica instalada. Sete dos dez maiores fabricantes são europeus, tendo sido responsáveis pela instalação de mais de 70% das turbinas instaladas em todo o mundo.

A energia eólica tem hoje em dia também um papel muito importante na produção de energia em Portugal. O primeiro parque eólico em Portugal foi construído na Ilha de Porto Santo em 1985, com nove aerogeradores de 30 kW de potência. O parque eólico de Sines foi o primeiro a ser construído em Portugal continental, em 1992.

Com o grande impulso dado a este tipo de energia nos últimos anos em Portugal, atingiu-se em 2010 o consumo mais elevado de energia eólica de sempre, as centrais eólicas abasteceram cerca de 17% do consumo total, o que corresponde a uma produção de 9,0 TWh. Esta produção representou um aumento de 20% face a 2009 como mostra a Tabela 1.1 [1] [2].

Tabela 1.1: Produção eólica e consumo total [1]

Produção Eólica / Consumo Total			
	2010	2009	2008
[GWh]			
Consumo SEN	52 203	49 873	50 595
Produção Eólica	9 024	7 493	5 695
	17%	15%	11%

1.3.2 Tipos de torres

A energia eólica teve nos últimos vinte anos um desenvolvimento tecnológico bastante significativo, com a potência unitária das turbinas a chegar aos 6000 kW e o diâmetro das pás a atingir os 126 m.

Também a configuração das torres sofreu bastantes alterações o longo destes anos: aerogeradores de eixo vertical ou de eixo horizontal, utilização de 1, 2 ou 3 pás (fixas e variáveis), aerogeradores com ou sem caixa multiplicadora (acoplamento directo), torre entrelaçada (Figura 1.1) ou tubular (Figura 1.2).



Figura 1.1: Torre entrelaçada [2]



Figura 1.2: Torre tubular [3]

Uma torre eólica é actualmente executada com uma secção tubular utilizando um aerogerador de eixo horizontal (com ou sem caixa multiplicadora), montado no topo da torre entre os 60 a 90m de altura, com 3 pás de orientação variável, de modo a aumentar a captação da energia cinética, sendo a turbina de 2000 kW de potência a mais utilizada.

A utilização de novos materiais no fabrico das pás, inicialmente fabricadas em alumínio, e os estudos dinâmicos de novos perfis de pás, tem permitido aumentar a performance da turbina. Actualmente as pás são fabricadas com materiais compósitos, utilizando uma mistura de fibra de vidro e resinas epoxy.

A torre é normalmente construída em aço, embora actualmente se utilizem já torres pré-fabricadas em betão armado.

Estas torres dividem-se em secções similares às secções das torres metálicas, mas neste caso são constituídas por vários elementos de betão que podem ser montados no parque eólico, ou em alternativa as secções podem ser transportadas já prefabricadas para que os tempos de montagem se assemelhem aos tempos de montagem das torres de aço. Como o betão é um material fabricado em Portugal e não é muito dispendioso, este tipo de torres pode representar uma vantagem em termos de competitividade económica face às torres metálicas [4].

1.3.2.1 Torres aplicadas *offshore*

As torres eólicas podem ser aplicadas em ambientes diversificados, em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*).

O primeiro país a instalar torres eólicas *offshore* foi a Dinamarca, com a instalação em 1991 do parque de Vindeby, constituído por 11 turbinas de 450 kW, instaladas a uma profundidade média de 5m. A

escassez de terrenos disponíveis em terra, em particular nos países do Norte da Europa, e o facto de os ventos marítimos apresentarem velocidades médias consideravelmente superiores às obtidas em terra, são as principais razões que levam à instalação de torres no mar.

A principal dificuldade na instalação deste tipo de torres prende-se com o tipo de fundação a utilizar. A selecção destas depende não só da profundidade mas também das características geológicas do fundo mar. Para águas pouco profundas (inferiores a 10m) recorre-se as fundações em betão. Para profundidade até aos 30m utilizam-se as fundações por estacaria, mono-pilar (Figura 1.3).



Figura 1.3: Torres eólicas *offshore* alicerçadas no fundo [5].

Acima destas profundidades terão de ser utilizadas soluções idênticas as plataformas petrolíferas, encontrando-se actualmente algumas destas soluções em fase de desenvolvimento (Figura 1.4).



Figura 1.4: Torres eólicas *offshore* flutuantes, protótipo construído na A. Silva Matos.

As torres *offshore* têm a vantagem de não afectarem a paisagem local devido ao impacto visual provocado pela sua dimensão. Mas por estarem sujeitas a um ambiente mais agressivo, têm que suportar o impacto das ondas e o contacto com a água salgada, por isso os materiais e o esquema de pintura utilizados na sua construção são diferentes dos aplicados nas torres *onshore*.

Possuindo Portugal uma frente marítima tão grande é considerável o seu potencial eólico, razão pela qual se começam a desenvolver os primeiros projectos para a instalação de torres *offshore* na costa Portuguesa. A primeira torre eólica *offshore* flutuante em Portugal será instalada na Aguçadoura, ao largo da Povoia do Varzim em Setembro deste ano. Este projecto é desenvolvido pela EDP em parceria com empresas Canadianas e Americanas e com a empresa portuguesa A. Silva Matos Energia, responsável pela construção do protótipo.

1.3.3 Componentes do sistema

A Figura 1.5 apresenta os principais componentes de um aerogerador convencional de eixo horizontal e directamente ligado à rede eléctrica.

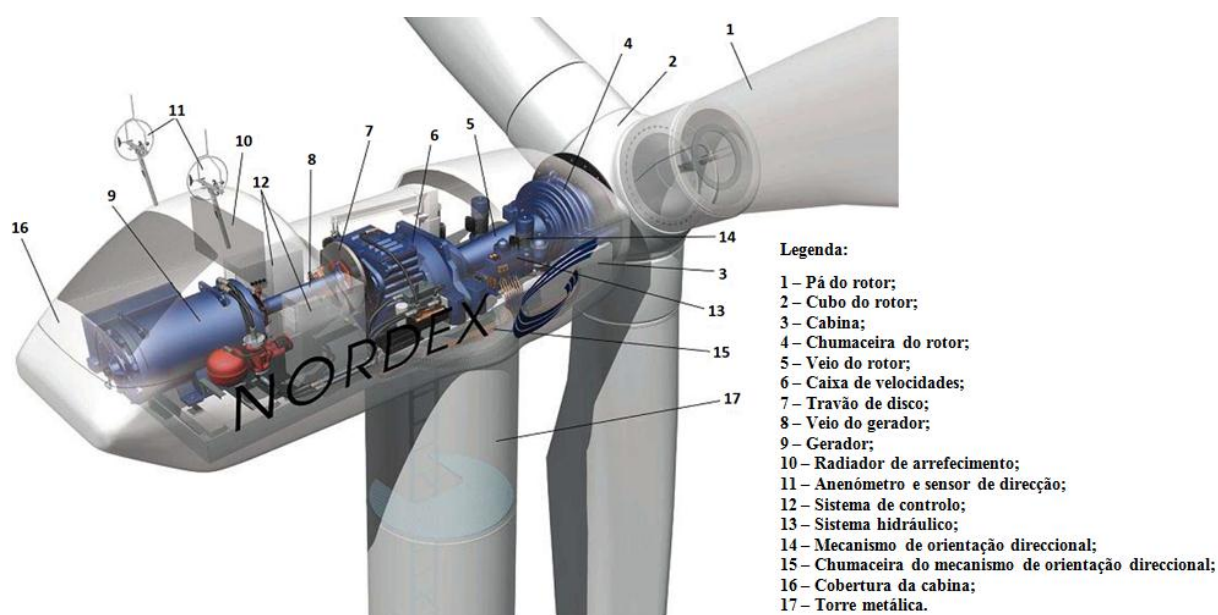


Figura 1.5: Esquema de aerogerador com caixa multiplicadora [6]

Uma torre eólica divide-se em 3 partes: o rotor composto pelos elementos 1, 2, 4 e 5 (Figura 1.5); a torre; e a cabina, composta por todos os restantes elementos.

A torre é responsável por suportar a cabina e o rotor, numa altura em que a velocidade do vento é maior e menos perturbada que junto ao solo. [6]

Um aerogerador começa a produzir electricidade quando a velocidade do vento atinge valores entre os 5 m/s e os 6 m/s, no entanto quando o vento atinge velocidades de 25 m/s, o aerogerador, por razões de segurança, pára automaticamente e desliga-se da rede. O aerogerador só volta a entrar a funcionamento quando o valor do vento descer abaixo daquele valor. Um parque eólico só deverá ser instalado em locais onde a velocidade média anual do vento for superior a 6 m/s.

1.4 Corte

Neste subcapítulo serão abordados os processos de corte aplicáveis à indústria em questão, destacando as características mais importantes de cada processo.

1.4.1 Introdução aos processos de corte

Os processos de corte podem ser separados em dois tipos, corte mecânico (exemplos: corte por arranque de apara, corte por arrombamento) e corte térmico (exemplos: corte por plasma, oxicorte, corte por laser).

Nesta secção apenas serão descritos os processos de corte relevantes para a montagem do aro da porta na torre, os processos de corte térmico, oxicorte e corte por plasma.

1.4.2 Processo oxicorte

O oxicorte (Figura 1.6) é um processo progressivo de seccionamento de metais no qual a zona de corte é aquecida até ao ponto de ignição do material. A chama é composta por um gás combustível (geralmente acetileno) e por um gás comburente (oxigénio).

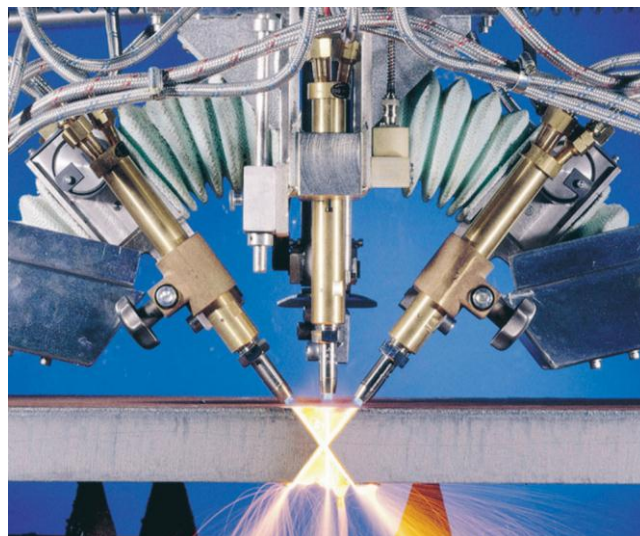


Figura 1.6: Oxicorte com 3 bicos [7]

Posteriormente a zona de corte é sujeita a uma combustão localizada e contínua devido à acção de um fluxo de oxigénio de elevada pureza.

Podem também ser utilizados como gases combustíveis propano ou gás natural. O combustível acetileno traz algumas vantagens face aos restantes, permitindo uma melhor regulação da chama e maior poder calorífico, garantindo assim maior rapidez no aquecimento da chapa a cortar, no entanto é o gás mais caro das hipóteses referidas. O gás propano apesar de trazer algumas desvantagens ao processo face ao gás acetileno, é utilizado no corte de chapas com grandes espessuras ou em cortes muito longos, devido ao seu baixo custo.

O oxigénio de corte (pureza de pelo menos 99,5%) apenas reage com o material aquecido, quando a temperatura de ignição do material for abaixo da temperatura de fusão. A temperatura de ignição depende essencialmente dos componentes de liga do material. [8] [9] [10]

As principais características deste processo de corte são as seguintes [8] [9] [10]:

- As espessuras de corte possíveis vão desde os 3 mm até aos 2000 mm;
- A zona removida durante o corte (*Kerf*) é bastante elevada;
- Pode provocar algumas deformações, que podem ser evitadas ou atenuadas através de algumas técnicas de corte;
- Em geral, os aços de construção com um teor de carbono até cerca de 0,3% cortam-se bem por oxicorte;
- Não é praticamente exercida força sobre o material a cortar.

1.4.3 Processo de corte por plasma

Os três primeiros estados de matéria são, o estado sólido, o líquido e o gasoso. Por esta ordem, consegue-se passar de um estado para o outro aplicando energia na forma de calor. Se for aplicada energia na forma de calor a um gás, este gás ioniza, passando ao 4º estado de matéria, o plasma, como mostra a Figura 1.7 [11].

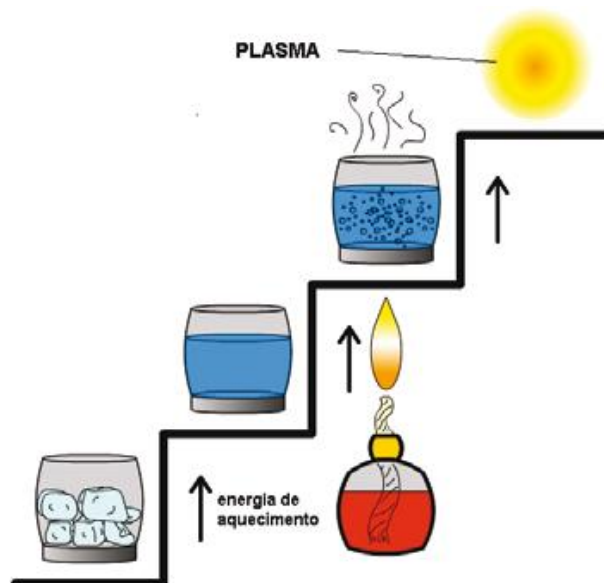


Figura 1.7: Os quatro estados de matéria [11]

A ionização do plasma torna-o condutor de corrente eléctrica.

No processo de corte por plasma esta corrente é transferida de uma fonte de alimentação eléctrica para o material a cortar através da tocha de corte.

A corrente de saída da fonte de alimentação determina a capacidade de corte do equipamento.

Todos os materiais que sejam condutores de electricidade podem ser cortados por plasma. [10] [12] [13]

A constrição da tocha garante que o jacto de gás plasma sai da tocha a velocidade elevada, permitindo não só a fusão do metal mas também ejeção do material pela junta de corte.

Para aumentar a velocidade e qualidade de corte, utilizam-se gases que permitam obter maior potência e elevada densidade de energia. Estes gases têm que ser bons condutores térmicos para que a energia armazenada no arco seja transferida eficazmente para a junta de corte.

O processo de corte por plasma, segundo a ESAB, consegue executar o corte de chapas com espessuras compreendidas entre 0,5 mm e 160 mm. [7]

1.4.4 Análise comparativa dos processos de corte

O processo de corte por plasma garante um acabamento final melhor do que o processo oxicorte, mas o processo oxicorte consegue cortar chapas com espessuras mais elevadas.

O corte por plasma tem maior rendimento que o processo oxicorte, conseguindo aumentar a produtividade até 7 vezes mais metros por hora. Os custos dos consumíveis do processo oxicorte são inferiores aos custos dos consumíveis do processo de corte por plasma, no entanto se for tido em conta o custo da mão-de-obra, chega-se facilmente à conclusão que o corte por plasma é mais económico [14].

O processo de corte por plasma remove menos material (ou seja, *kerf* mais reduzido) que o processo oxicorte.

Por estas razões, o processo de corte por plasma é o processo de corte mais adequado para o trabalho pretendido.

1.5 Soldadura

Neste subcapítulo serão abordados os processos de soldaduras aplicáveis à indústria em questão, sendo eles, MAG (GMAW), fios fluxados (FCAW) com protecção gasosa e arco submerso (SAW), destacando as características relevantes de cada processo para o trabalho pretendido. Será também explicado na secção 1.4.2 alguma terminologia e simbologia.

1.5.1 Introdução aos processos de soldadura

Os processos de soldadura podem ser classificados em processos de soldadura por fusão e processos de soldadura no estado sólido. Na Figura 1.8 apresentam-se os vários processos de soldadura por fusão.

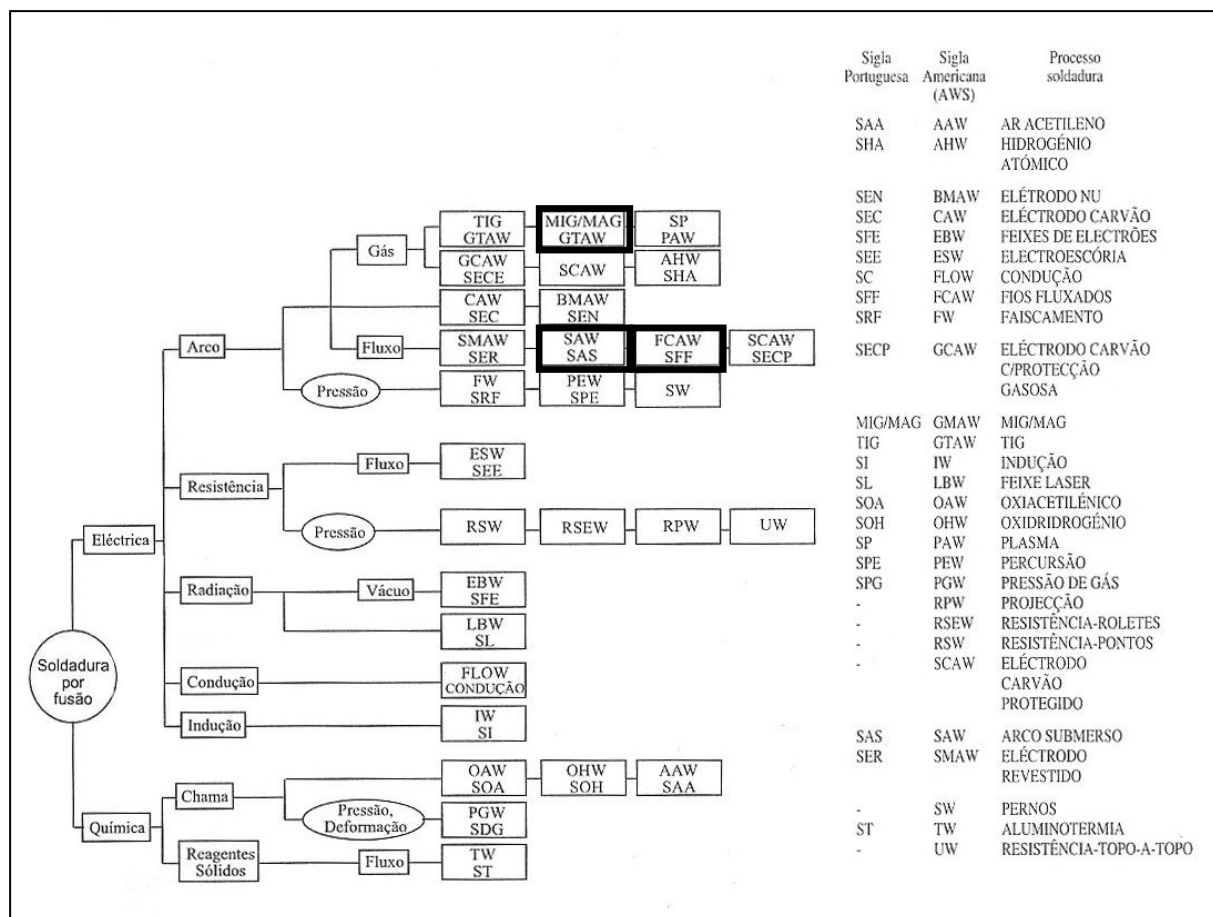


Figura 1.8: Classificação de processos de soldadura por fusão, com processos de soldadura utilizados em evidência [9]

Na Tabela 1.2 são apresentadas as aplicações dos processos de soldadura tendo em conta o tipo de aço e a espessura das chapas a soldar.

Tabela 1.2: Aplicações dos processos de soldadura [6]

Material	Espessura	Processos de soldadura		
		SAW	GMAW	FCAW
Aço carbono	P	x	x	
	I	x	x	x
	M	x	x	x
	G	x	x	x
Aços de baixa liga	O	x	x	
	I	x	x	x
	M	x	x	x
	G	x	x	x

Processos de Soldadura

SAW - Arco Submerso

GMAW - MAG

FCAW - Fios Fluxados

Espessuras

P - Pequena (até 3 mm)

I - Intermediária (3 a 6 mm)

M - Média (6 a 19 mm)

G - Grande (mais de 19 mm)

1.5.2 Terminologia e simbologia

O tipo de chanfro (Figura 1.9) da junta é um parâmetro muito importante dos processos de soldadura, uma vez que para além de ter que garantir espaço para a tocha poder executar o cordão de soldadura, o tipo de chanfro escolhido define a quantidade de material a adicionar durante o processo de soldadura.

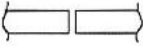

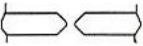
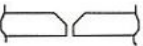
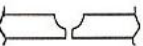
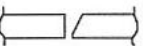

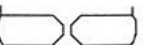

Designação	Esquema	Símbolo
Bordos direitos		
Em V		∨
Em X		X
Em Y		Y
Em U		U
Em meio V		∟
Em K		K
Em Y duplo		⋈
Em U duplo		⊔

Figura 1.9: Tipos de chanfros [9]

Na Figura 1.10 apresentam-se os tipos de juntas soldadas.

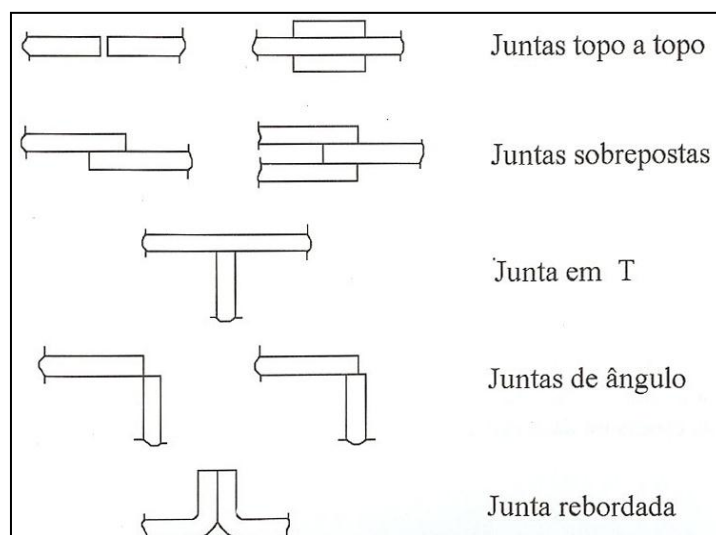


Figura 1.10: Tipos de juntas [9]

A Figura 1.11 apresenta as posições utilizadas em soldadura industrial. A posição de soldadura determina a posição da tocha relativamente às peças soldadas.

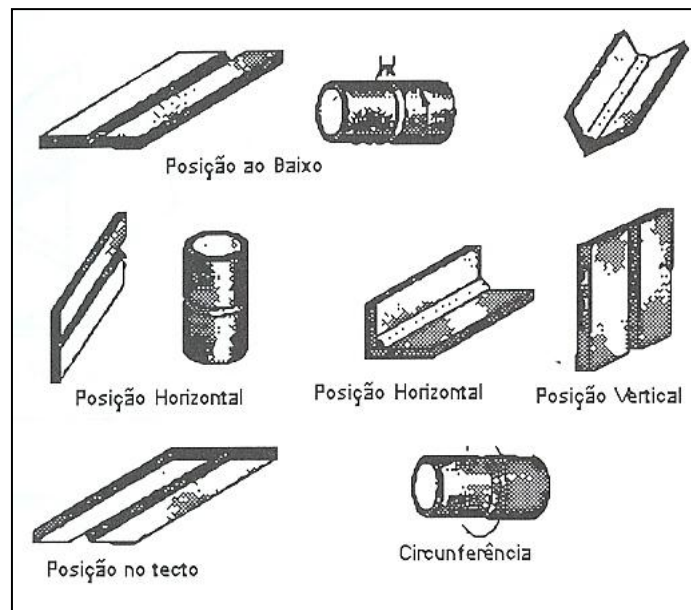


Figura 1.11: Posições de soldadura [9]

1.5.3 Processo de soldadura MAG

1.5.3.1 Fundamentos do processo

O processo de soldadura MAG (*Metal Active Gas*) é um processo de soldadura por fusão. A fusão do material de adição com o material de base é obtida através do calor desenvolvido por um arco eléctrico. É um processo em que se utiliza um consumível de alimentação contínua (eléctrodo em fio), na ponta do qual se estabelece o arco eléctrico. O eléctrodo, o arco e as peças a soldar são protegidos da contaminação atmosférica por um fluxo de gás activo que passa através da tocha de soldadura, como mostra a Figura 1.12.

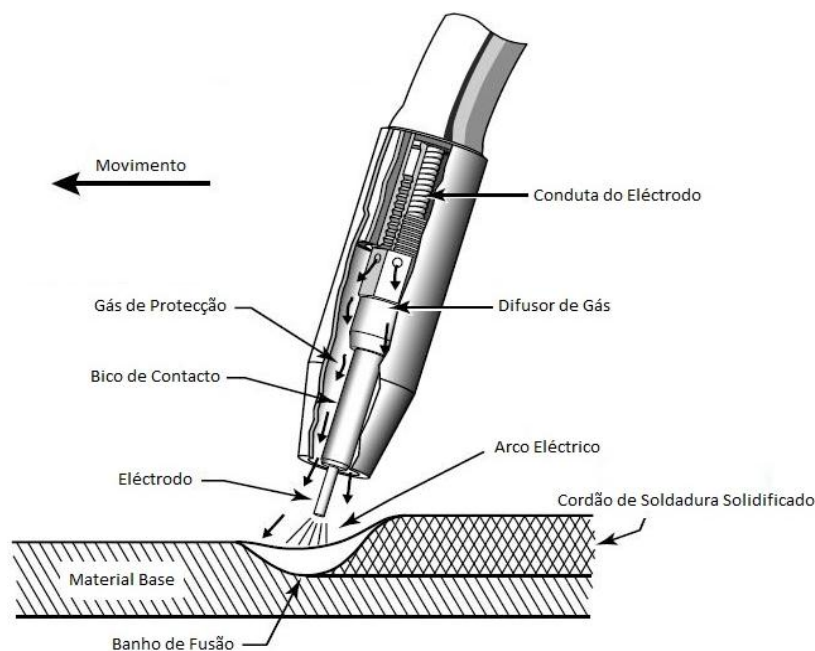


Figura 1.12: Componentes intervenientes no processo MAG [15]

Sob o arco eléctrico o fio é alimentado a uma velocidade constante e o comprimento do arco eléctrico mantém-se inalterado devido ao efeito de “auto-regulação”. Este efeito consiste no ajuste automático da intensidade de corrente a cada alteração do valor da tensão, alterando a taxa de fusão do fio, de tal forma que se restabeleça o comprimento inicial do arco.

Da informação apresentada na Figura 1.13 é importante referir que a “distância bocal/peça” é também conhecida como “*stand-off*” e que o “*stick-out*” é o comprimento da extremidade livre do eléctrodo.

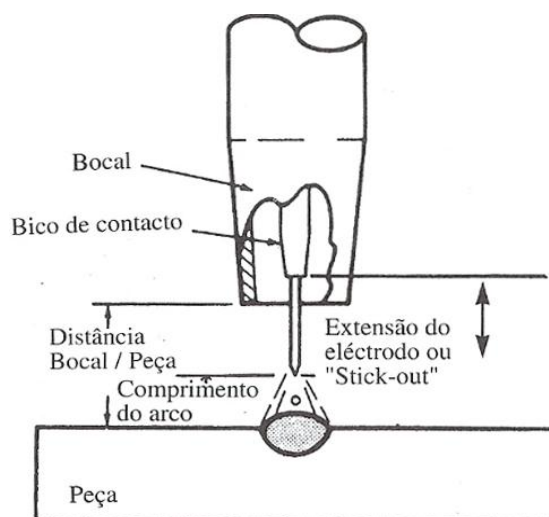


Figura 1.13: Terminologia do processo MAG [9]

Este processo pode soldar uma grande variedade de metais.

É importante conhecer os vários modos de transferência de metal de modo a poder optar pelo tipo de transferência mais adequado ao posicionamento da tocha durante o processo e ao tipo de materiais a soldar. Os modos de transferência que ocorrem no processo de soldadura dos aros das portas são, o modo de transferência por curto-circuito e o modo de transferência por “spray”.

Cada tipo de transferência está relacionado com os seguintes parâmetros introduzidos:

- Amplitude e tipo de corrente,
- Tensão,
- Composição do eléctrodo,
- Diâmetro do eléctrodo,
- Extensão do eléctrodo
- Gás de protecção. [9] [16]

1.5.3.2 Modos de transferência

- Transferência em curto-circuito

O modo de transferência por curto-circuito ocorre apenas nos instantes em que o eléctrodo está em contacto com o banho de fusão. O metal é transferido para o banho de fusão a cada curto-circuito. O eléctrodo entra em curto-circuito com a peça entre 20 e 200 vezes por segundo.

São usados eléctrodos com diâmetros que podem variar entre 0,8 e 1,2 mm.

Este modo é caracterizado por utilizar polaridade inversa, baixos valores de tensão e intensidades de corrente baixas.

Este tipo de transferência é adequado a soldadura em posição (em posições diferentes da posição ao baixo), devido à rápida solidificação do material adicionado. É um modo de transferência adequado para soldar chapas de pequenas espessuras porque proporciona uma baixa entrega térmica, reduzindo assim as distorções e empenos.

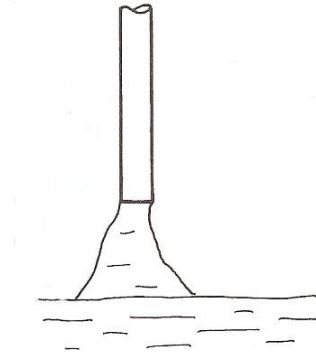


Figura 1.14: Transferência em curto-circuito [9]

- Transferência em “Spray”

Este modo caracteriza-se pela projecção de pequenas gotas com uma frequência de transferência muito elevada.

Para que este modo de transferência ocorra deve usar-se polaridade inversa e intensidade de corrente inferior à corrente de transição. A corrente de transição depende do material utilizado e do diâmetro do eléctrodo, podendo ser definida como sendo o valor de intensidade de corrente para o qual ocorre a transição de outros modos de transferência para o modo de transferência em spray.

Com este modo de transferência consegue-se uma entrega térmica elevada e um banho de fusão grande, características que são adequadas a situações que requerem elevadas taxas de depósito na posição ao baixo, mas limitam a sua utilização em cordões realizados noutras posições, no passe de raiz e em chapas com pequenas espessuras.

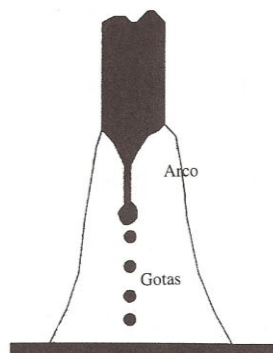


Figura 1.15: Transferência em spray com elevada intensidade de corrente [9]

1.5.4 Processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa

1.5.4.1 Fundamentos do processo

O processo de soldadura por Fios Fluxados (Figura 1.16) é um processo de soldadura por arco eléctrico, onde a fusão dos materiais de base e de adição é obtida através do aquecimento do fio eléctrodo consumível e do material base até à temperatura de fusão.

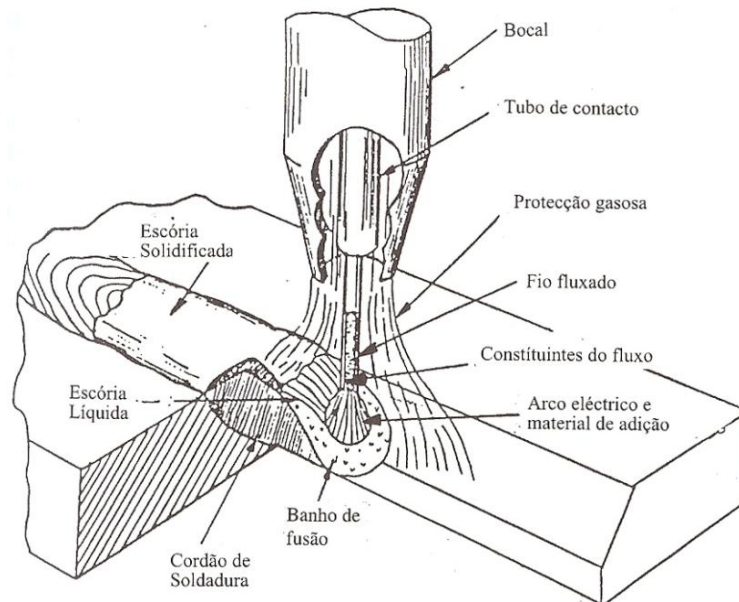


Figura 1.16: Processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa [9]

O fio eléctrodo utilizado neste processo tem geometria tubular, o que traz inúmeras vantagens ao processo comparativamente com o processo de soldadura MAG. A protecção do banho de fusão é realizada através da fusão e escorificação de elementos de fluxo que se encontram no interior do eléctrodo tubular à qual se junta uma protecção gasosa exterior. Assim os cordões de soldadura apresentam-se total ou parcialmente cobertos por uma camada de escória que terá de ser retirada antes de ser aplicada outra passagem.

A possibilidade de adição de elementos de liga no fluxo que está contido no interior do consumível pode permitir benefícios na composição do cordão de soldadura.

Este processo é normalmente utilizado na soldadura de aços de baixa e média liga e em aços inoxidáveis com espessuras a soldar desde os 2 mm até 80 mm, podendo ser utilizado em todas as posições de soldadura, no modo semi-automático, automático ou mecanizado. [9] [13]

1.5.4.2 Comparação com o processo de soldadura MAG

O processo de soldadura por Fios Fluxados tem muitos pontos em comum com o processo de soldadura MAG, utilizando os mesmos equipamentos e acessórios. Os modos de transferência são também semelhantes, dependendo dos parâmetros operacionais inseridos. A terminologia do processo é também semelhante à apresentada na Figura 1.13 para o processo MAG.

O processo de soldadura por fios fluxados tem uma produtividade maior que o processo de soldadura MAG como mostra a Figura 1.17.

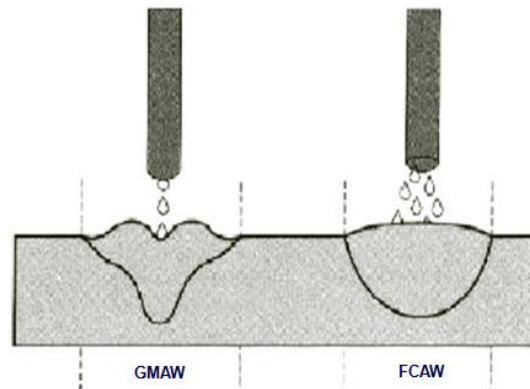


Figura 1.17: Comparação dos eléctrodos do processo MAG (GMAW) com os eléctrodos do processo fios fluxados (FCAW)

1.5.5 Processo de soldadura por arco submerso

1.5.5.1 Fundamentos do processo

O processo de soldadura por arco submerso é um processo automático no qual o calor requerido para fundir tanto o material base como o material de adição é gerado por efeito *Joule* (devido à passagem de corrente eléctrica entre o fio eléctrico e a peça a soldar) e por arco eléctrico. O material de adição, o material base e o arco eléctrico são cobertos por um fluxo granulado, o qual funde parcialmente formando escória como apresenta a Figura 1.18.

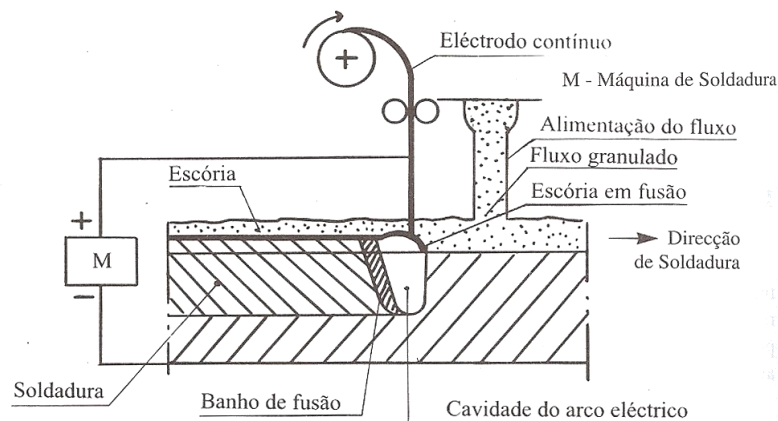


Figura 1.18: Princípio do processo de soldadura por arco submerso [9]

A utilização do fluxo granulado traz inúmeras vantagens ao processo, o facto do arco eléctrico estar completamente submerso em fluxo granulado, permite a utilização de intensidades de corrente elevadas sem que existam explosões, salpicos de metal em fusão ou fumos e evita também o contacto do metal em fusão com a atmosfera.

As intensidades de corrente utilizadas (de 200 a 2000A) garantem elevada penetração e grande taxa de depósito.

O rendimento térmico do processo é elevado porque grande parte do arco eléctrico fica abaixo da superfície da chapa a soldar e não há perdas de material fundido devido a projecções. No entanto, o facto do arco eléctrico não ser visível, torna indispensável um rigoroso ajustamento dos parâmetros de soldadura antes de iniciar a operação.

A necessidade de duas condutas, uma de projecção de granulado e outra de aspiração de granulado (para reutilização do mesmo), para além de todos os outros equipamentos tornam o sistema complexo em relação aos dois métodos descritos anteriormente. São necessários sistemas de suporte de fluxo sempre que a posição de soldadura não for ao baixo. [9] [17]

1.5.6 Análise comparativa dos processos de soldadura

O processo de soldadura por arco submerso garante uma taxa de depósito muito superior aos restantes processos como mostra a Tabela 1.3, no entanto, este processo tem a desvantagem de ser difícil de automatizar em percursos que não sejam rectilíneos.

Tabela 1.3: Comparação dos processos de soldadura

	MAG	Fios Fluxados	Arco Submerso
Factor de marcha (%)	60	60	100
Taxa de depósito (kg/h)	1,2 a 1,5	1,5 a 2,5	Superior a 2,5

O processo de soldadura por fios fluxados tem maior taxa de depósito que o processo de soldadura MAG, mas tem a desvantagem de deixar escória. Mas mesmo com esta desvantagem o processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa continua a ter um rendimento total superior ao processo de soldadura MAG.

Não conseguindo automatizar o processo de soldadura por arco submerso, o processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa será o processo de soldadura mais adequado ao trabalho em questão.

1.6 Dispositivos de soldadura

1.6.1 Introdução e visão geral

Nesta dissertação considera-se que dispositivo de soldadura é um mecanismo que segue uma determinada trajectória, realizando o processo de soldadura de forma automática não programada com a supervisão de um operador.

Existem diversos dispositivos de automatização de processos de soldadura.

1.6.2 Vantagens da utilização de dispositivos de soldadura

Os dispositivos de soldadura trazem inúmeras vantagens face ao trabalho realizado manualmente. Os dispositivos de soldadura garantem uma maior uniformidade dos cordões de soldadura, maior

velocidade de trabalho e proporcionam maior repetibilidade das operações do processo, diminuindo a duração e custos do processo.

1.6.3 Dispositivos existentes no mercado

Na fabricação de torres eólicas os sistemas de automatização são utilizados principalmente no processo de soldadura entre as várias secções da torre metálica, no qual se utiliza o processo de soldadura por arco submerso, como mostra a Figura 1.19. Como referido na secção 1.4.6, este processo é adequado apenas a soldadura ao baixo e é difícil automatizá-lo em trajectórias curvilíneas devido às condutas de projecção e aspiração de granulado. Pelo que estes dispositivos são apenas responsáveis por manter a trajectória rectilínea e executar correctamente o processo de soldadura, como mostra a Figura 1.19.



Figura 1.19: Sistema de soldadura SAW automatizada da ESAB [7]

Quanto à automatização do processo de soldadura dos aros das portas às torres metálicas, a ESAB desenvolveu um dispositivo (Figura 1.20) que segue a geometria do aro da porta mas não faz a variação automática da cota vertical da tocha de soldadura, sendo necessário o operador ir regulando a altura da tocha ao longo do processo.



Figura 1.20: Sistema de soldadura automatizada Frametrac da ESAB [7]

2.Caracterização do processo de produção

O aro da porta é um componente importante na estrutura da torre metálica, conferindo a esta resistência a flexão.

A geometria do aro da porta é constituída por duas linhas curvilíneas elípticas unidas por dois segmentos de recta. O encaixe na torre é realizado de modo a que todas as faces planas do aro fiquem perpendiculares à base da torre eólica. A distância entre o aro da porta e a torre metálica varia devido à conicidade desta, como mostra a Figura 2.1.

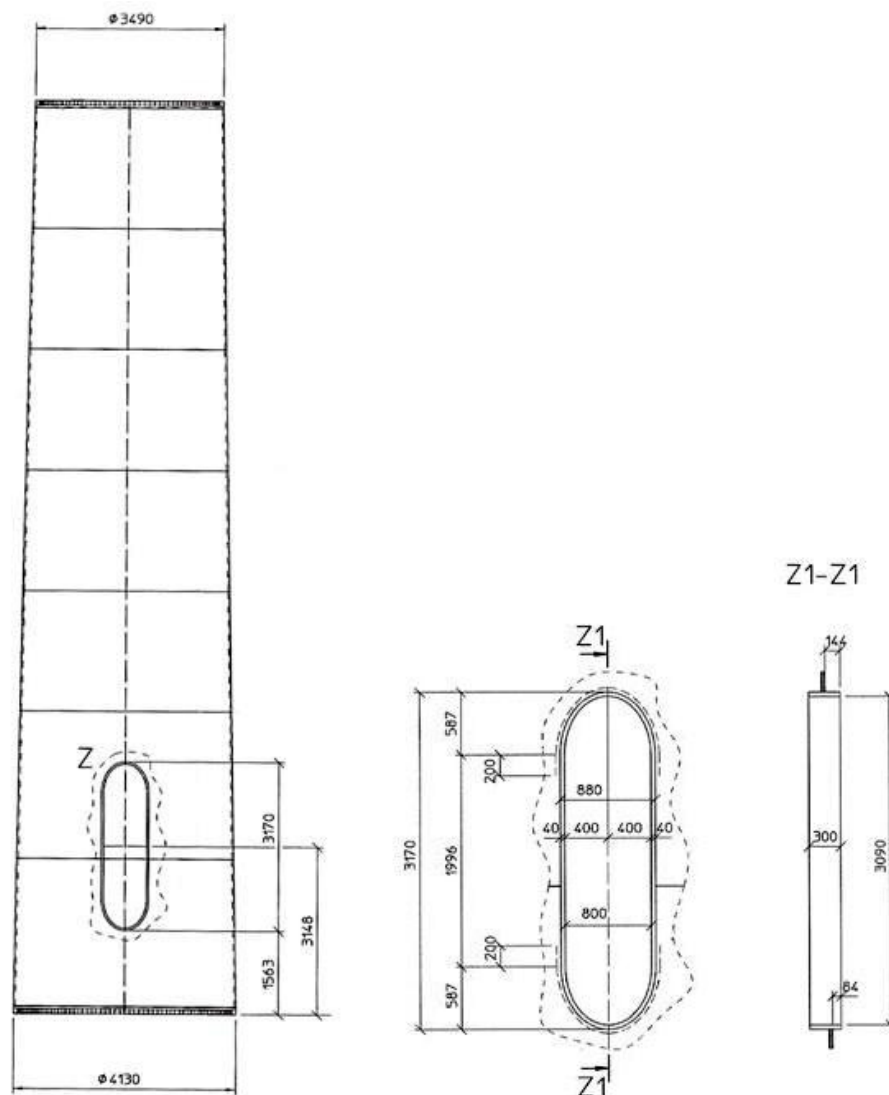


Figura 2.1: Aro da porta colocado na torre metálica (excerto do desenho de uma torre metálica [18])

As dimensões do aro da porta e as dimensões da torre metálica variam de modelo para modelo de torre. Para este estudo foram analisados 2 modelos de aros de porta e 5 modelos de torres metálicas. Os dois modelos de aros diferem um do outro na qualidade do material utilizado e nas dimensões, sendo a geometria semelhante.

2.1 Perspectiva actual

O processo de montagem dos aros das portas das torres eólicas é executado com a torre colocada na horizontal (deitada), apoiada sobre posicionadores de soldadura. Os posicionadores de soldadura para além de apoiarem a torre, têm como função rodar a torre em torno do seu próprio eixo, para assim poder posicioná-la conforme for mais conveniente a cada operação a realizar.

As operações do processo repartem-se em três etapas:

Na primeira fase realiza-se o corte do contorno do aro da porta na torre metálica com auxílio de um molde metálico, com geometria aproximada à geometria do aro que posteriormente será montado, executando-se seguidamente o chanfro de soldadura. Este processo é realizado por oxicorte manual nas superfícies curvilíneas elípticas e com carro de oxicorte nos segmentos de recta do aro.

Na segunda etapa monta-se o aro da porta no local pretendido.

Por fim, na terceira parte, realiza-se a soldadura do aro da porta.

Antes de iniciar a soldadura e durante a sua execução é necessário assegurar um pré-aquecimento da junta de soldadura a uma temperatura $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Depois, com a torre metálica colocada de modo a que a junta de soldadura fique o mais baixo possível, executa-se a soldadura do lado interior da torre de acordo com a sequência apresentada na Figura 2.2.

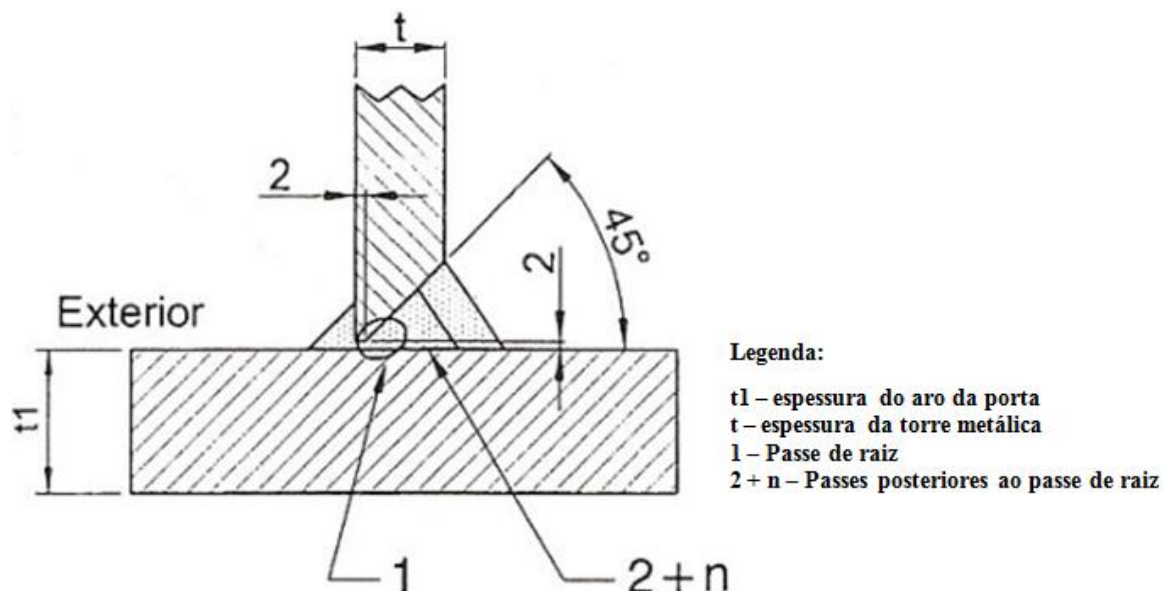


Figura 2.2: Junta de soldadura na união entre o aro da porta e a torre eólica [18]

Concluída a soldadura pelo interior, a torre é rodada 180° em torno do seu próprio eixo. A seguir procede-se à limpeza de raiz do cordão de soldadura, com *arc-air*.

De seguida é executada a soldadura pelo exterior da torre.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os parâmetros de soldadura utilizados.

Tabela 2.1: Parâmetros de soldadura utilizados [18]

Processo de Soldadura		FCAW
Parâmetros de Soldadura	Intensidade de corrente (A)	265±13,2
	Tensão (V)	28±1,4
	Velocidade de deposição (mm/min)	450±22,5
	<i>Stick-out</i> (mm)	15±3
	Tipo de alimentação	DC +
Materiais de adição	Marca do fio	OK TUBROD 15.00
	Diâmetro do fio (mm)	1,2
	Marca comercial do gás	ARCAL 21
	Débito de gás (L/min)	16

É importante referir que, na realização do processo de soldadura, é necessário remover a escória depois de cada passagem.

Após a execução da soldadura procede-se ao afagamento do cordão de soldadura, tanto do lado interior como do exterior, para evitar concentração de tensões.

O posicionamento da torre varia ao longo do processo, para que todos os cordões de soldadura possam ser realizados na posição ao baixo.

Actualmente o processo é realizado com chanfro em meio V, posicionado como mostra a Figura 2.2, realizado após o corte com ângulo de aproximadamente 45°.

Não há grandes restrições na escolha do chanfro a utilizar. Este pode ser alterado, em função da solução a projectar, virando-se o chanfro actual, ou então optando-se por utilizar um chanfro em K.

Este processo ocupa 2 operadores durante cerca de 63 horas, sendo 8 horas referentes ao processo de corte, chanfragem e montagem do aro e as restantes 55 ocupadas com o processo de soldadura.

Por fim realiza-se a verificação da qualidade do cordão de soldadura, por ultra-sons e por líquidos penetrantes, seguindo o nível 2 da norma EN1712 e o nível 1 da norma EN1289, respectivamente.

2.2 Problemas detectados no processo

Para otimizar o processo, analisou-se aprofundadamente todas as acções e métodos utilizados.

Desta análise concluiu-se que a diferença entre as dimensões reais do aro da porta e as dimensões do molde utilizado aquando do processo de corte variam muito, aumentando consequentemente o tamanho do cordão de soldadura, o que leva ao aumento da duração do processo.

Os eléctrodos utilizados no processo de soldadura têm 1,2 mm de diâmetro, o que proporciona baixas taxas de deposição de material de adição quando comparadas com a taxa de deposição que os eléctrodos de maior dimensão conseguiriam proporcionar [9].

O processo ocupa 2 operadores qualificados durante um largo período de tempo, sendo parte deste tempo utilizado em pausas devido ao cansaço.

2.3 Soluções admissíveis

Neste subcapítulo descrevem-se sucintamente as soluções encontradas para corrigir os pontos fracos detectados.

Foi ponderada a hipótese de apertar a tolerância utilizada na construção do aro da porta, com o objectivo de diminuir a variação das medidas entre cada exemplar do aro da porta e o molde utilizado para realizar o corte da torre. Conseguir-se-ia assim diminuir a distância entre a superfície do aro da porta e o chanfro em meio V feito na torre metálica, diminuindo consequentemente o espaço a preencher e o número de passagens necessárias para realizar o processo de soldadura.

Tendo em conta a dimensão do cordão de soldadura, chegou-se à conclusão que os eléctrodos utilizados eram de diâmetros reduzidos. Após análise do modelo de eléctrodo utilizado, verificou-se que existe um eléctrodo semelhante, com propriedades químicas idênticas mas com 2,4 mm de diâmetro. A mudança para o eléctrodo de 2,4 mm permitiria aumentar a taxa de deposição para mais do dobro da conseguida com eléctrodos de 1,2 mm de diâmetro [9]. Com esta medida conseguir-se-ia diminuir para menos de metade o número de passagens necessárias para preencher toda a junta de soldadura. Só é possível adoptar esta solução se o processo de soldadura for mecanizado, não sendo necessário haver contacto com o operador. Quanto maior for o diâmetro dos eléctrodos, maior é o calor necessário para que o eléctrodo funda e este calor dificulta o trabalho dos operadores.

A análise dos problemas detectados indicou que a longa duração do processo de soldadura é também causada pela necessidade que os operadores têm de fazer pausas devido ao cansaço. Para corrigir este problema pensou-se em algumas soluções, desde a optimização dos métodos utilizados (não alterando a estratégia de trabalho) até à automatização ou robotização de alguns dos processos.

3. Dispositivo de soldadura

Neste capítulo apresentam-se todos os pormenores relativos ao desenvolvimento do dispositivo de soldadura solicitado pela A. Silva Matos, Energia, S.A.

3.1 Requisitos do sistema

Em conjunto com a A. Silva Matos, foi estabelecido um conjunto de requisitos aos quais se deve obedecer para a elaboração de um dispositivo com objectivo de automatizar o processo de soldadura dos aros das portas.

1. O mecanismo tem que seguir a trajectória do cordão de soldadura pretendido, tendo em atenção que a trajectória é espacial (precisa de 3 coordenadas para ser descrita).
2. Deve ser previsto o movimento rotativo da tocha.
3. Deve ser previsto o movimento axial da tocha.
4. O ajuste dos mecanismos de posicionamento da tocha deve ser feito manualmente.
5. A velocidade do movimento do dispositivo em torno do aro da porta tem que ser constante, podendo ser regulada conforme os parâmetros do processo de soldadura utilizado.
6. O dispositivo não deve ocupar mais que um operador.

3.2 Descrição da solução

O dispositivo tem que seguir a geometria do aro da porta e a tocha tem que seguir o cordão de soldadura. O dispositivo será montado sobre o aro da porta como mostra a Figura 3.1.

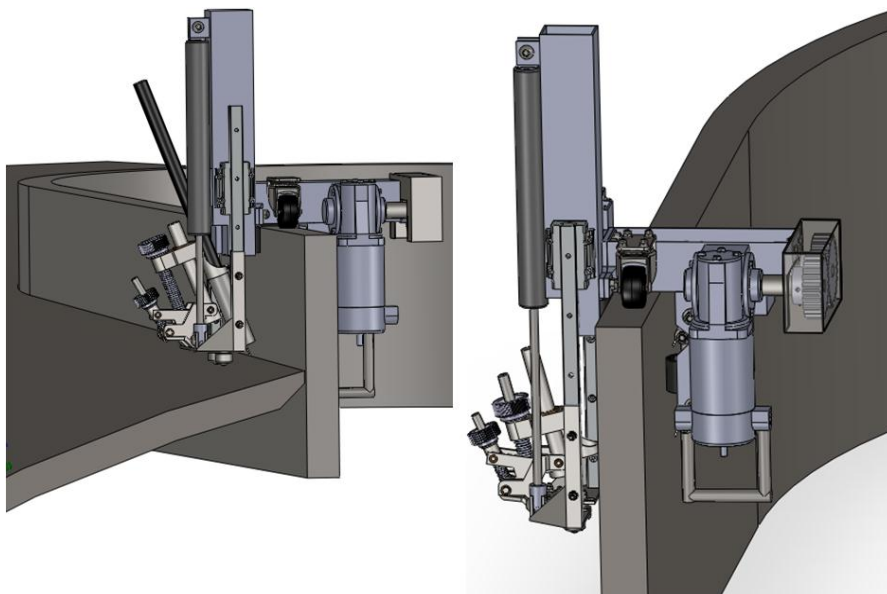


Figura 3.1: Dispositivo de soldadura colocado no aro da porta

O chassis do dispositivo divide-se em 4 partes como mostra a Figura 3.2, para facilitar tanto o processo de construção, como a substituição de alguma das partes em caso de anomalia.

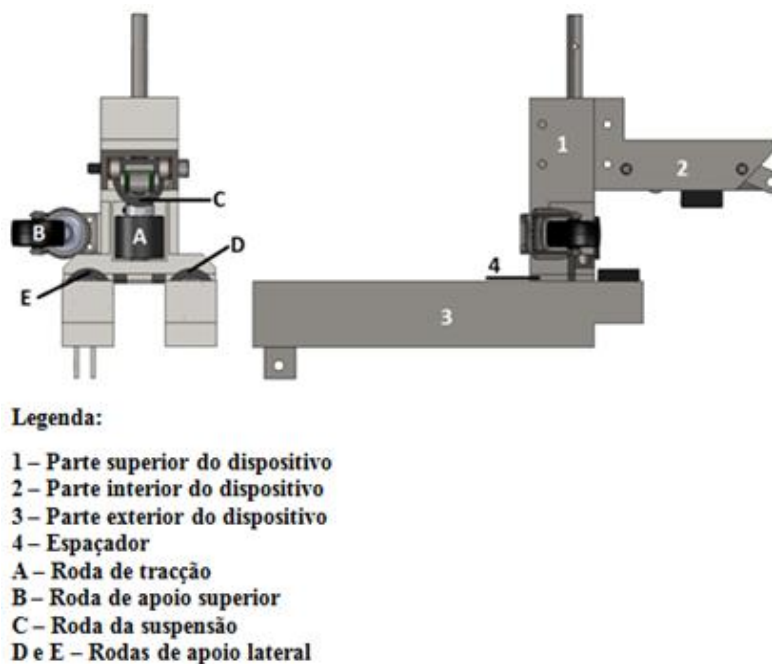


Figura 3.2: Montagem do chassis do dispositivo com as rodas colocadas

A parte 1 do chassis, é a parte superior do dispositivo, tem duas rodas com funções distintas, a roda de tracção (roda A), larga e com superfície lisa, para aumentar a força de atrito entre a roda e a superfície do aro da porta, e uma roda de apoio (roda B), que mantém o dispositivo equilibrado, mas não interfere no movimento do mesmo. Para este efeito optou-se por uma roda com movimento de translação de 360°. O contacto entre esta roda e o aro da porta ocorre no plano médio da roda, de modo a facilitar o movimento de translação da roda ao longo do percurso.

A parte interior do dispositivo tem uma roda (roda C) que aplica uma força normal à superfície lateral do aro da porta, por intermédio de um sistema de “suspensão” explicado mais adiante. A força exercida por esta roda mantém as rodas D e E em contacto com a superfície do aro da porta.

A parte 4 do dispositivo é um espaçador que será aplicado entre a parte 1 e a parte 3 sempre que a espessura do aro da porta for de 45 mm, no caso da espessura utilizada no aro da porta ser 40 mm não se utiliza o espaçador.

Para que o processo de soldadura seja bem sucedido, a tocha tem que manter constante a distância até à junta de soldadura ao longo do percurso em torno do aro da porta, para isso é necessário garantir que a distância medida na horizontal entre a parte 3 do chassis do dispositivo e o aro da porta se mantém suficientemente constante. Optou-se por aplicar um mecanismo que force o dispositivo a manter-se encostado à parte exterior do aro, para tal, colocou-se um mecanismo do tipo “suspensão” apresentado na Figura 3.3.

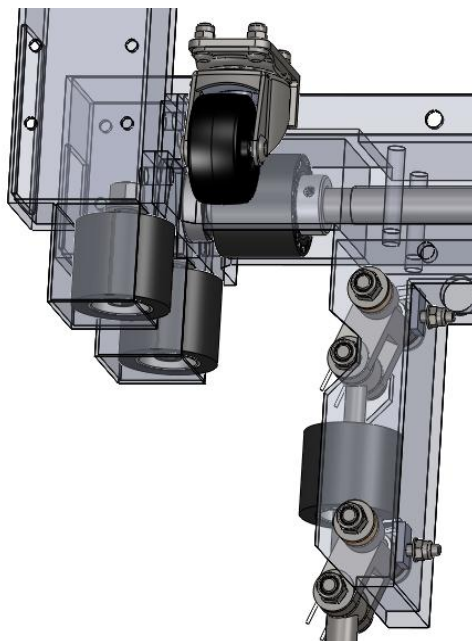


Figura 3.3: Dispositivo com rodas e mecanismo tipo suspensão

O mecanismo utilizado é baseado no sistema de suspensão de triângulos sobrepostos, também conhecido como suspensão de paralelogramo deformável, muito utilizada na construção automóvel. Este sistema garante que a superfície da roda está sempre toda em contacto com o aro da porta, mantendo o contacto durante o alongamento das molas, porque a geometria do mecanismo nunca deixa de ser um paralelogramo [19].

Neste caso, considerou-se que a adopção de duas molas de torção, aplicando uma em cada eixo, consegue trazer algumas vantagens face à mola de compressão utilizada nos automóveis. Se fossem utilizadas molas de compressão helicoidais, para além da parte 2 do chassis se tornar mais complexa devido à fixação da mola de compressão ter que ser feita por baixo da “suspensão”, a fixação da mola seria mais complicada uma vez que a mola não faria apenas o movimento de compressão/extensão, teria que fazer também um pequeno movimento de rotação ao longo do alongamento, e para isso teria que ser fixada em eixos que permitissem essa rotação como acontece no sistema mola/amortecedor dos automóveis. Utilizando duas molas de torção pode-se garantir que, em caso de rotura de uma das molas, a outra garantirá a continuação do processo de soldadura, para isso basta aumentar o coeficiente de segurança aquando da escolha das molas, de modo a garantir que cada uma das molas aguenta o esforço total necessário para o bom funcionamento do mecanismo.

A parte inferior da união dos triângulos de suspensão terá uma parte que será puxada pelo operador para que seja possível colocar o dispositivo no aro da porta.

Como a tocha está situada entre as duas rodas da parte 3 do chassis como mostra a Figura 3.4, a tocha está mais próxima da superfície do aro quando o dispositivo percorre as superfícies curvilíneas elípticas do aro da porta, do que quando percorre os segmentos de recta. Para minimizar este problema, as rodas situam-se o mais próximo possível uma da outra.

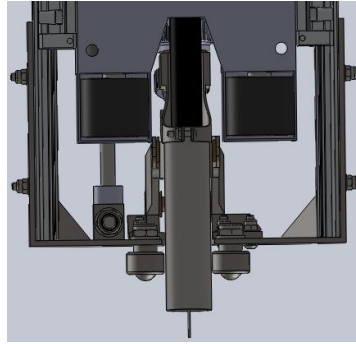


Figura 3.4: Tocha colocada entre as duas rodas

Este dispositivo terá duas chumaceiras de rolamento lineares acopladas paralelamente a uma mola de gás. Estes 3 elementos serão fixados a uma chapa que suporta os elementos de posicionamento e suporte da tocha. Esta chapa terá duas esferas fixadas, que durante o movimento do dispositivo, serão forçadas a estar em contacto com a torre metálica, numa zona próxima da junta de soldadura. O movimento das duas esferas define a cota vertical da tocha. A força exercida pela mola de gás mantém uma das esferas junto à superfície da torre metálica como é visível na Figura 3.5, estando neste caso a esfera da esquerda junto à superfície da torre e a esfera da direita no ar.

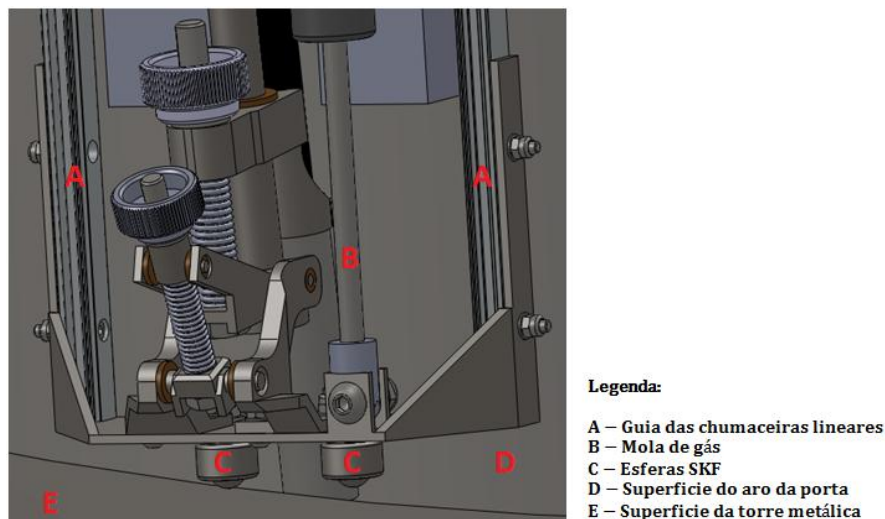


Figura 3.5: Apresentação do funcionamento das esferas

Optou-se por duas esferas porque esta solução consegue metade da distância vertical entre a ponta da tocha e a junta de soldadura, em relação à variação da distância conseguida aplicando apenas uma esfera devido à simetria do movimento realizado.

Esta foi a solução encontrada depois de se concluir que a aplicação de uma única esfera posicionada na zona entre estas duas esferas dificultava o ajuste da tocha ao longo do processo.

A tocha seguirá o movimento imposto pelo sistema “chumaceiras lineares/mola de gás/esferas”, de modo a garantir que a distância vertical ao cordão de soldadura se mantém constante o suficiente para

que o processo de soldadura seja bem sucedido. Foi encontrada assim a solução para que a diferença de cotas provenientes da conicidade da torre metálica não sejam um problema.

As esferas serão fixadas à chapa que suporta a tocha por aparafusamento. Os furos passantes onde será feita essa fixação terão uma geometria que possibilita a afinação do posicionamento das esferas, podendo regular a distância destas à superfície do aro como mostra a Figura 3.6.

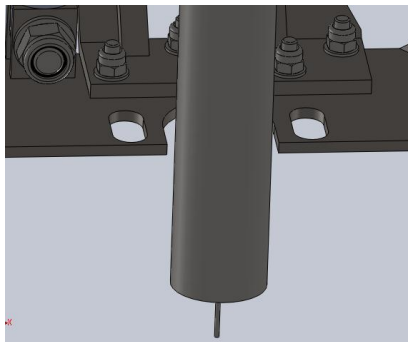


Figura 3.6: Furos passantes para fixação das esferas

Esta afinação pode ser necessária no caso do chanfro ter um ângulo ligeiramente maior que o previsto ou no caso da diferença de cotas entre o corte realizado na torre metálica e o aro da porta ser maior do que o previsto.

Como referido anteriormente, o processo de soldadura necessita de várias passagens até que o cordão de soldadura fique totalmente concluído, por isso é necessário ajustar a tocha a cada passagem, para tal foi requerido pela ASM que a tocha tivesse um sistema de ajuste de rotação e um sistema de ajuste do movimento axial, ambos com precisão. Optou-se por dois sistemas com funcionamentos muito semelhantes, tanto o sistema de movimento linear como o sistema de rotação da tocha utilizam fusos de movimento auxiliados por molas helicoidais de compressão como apresentado na Figura 3.7.

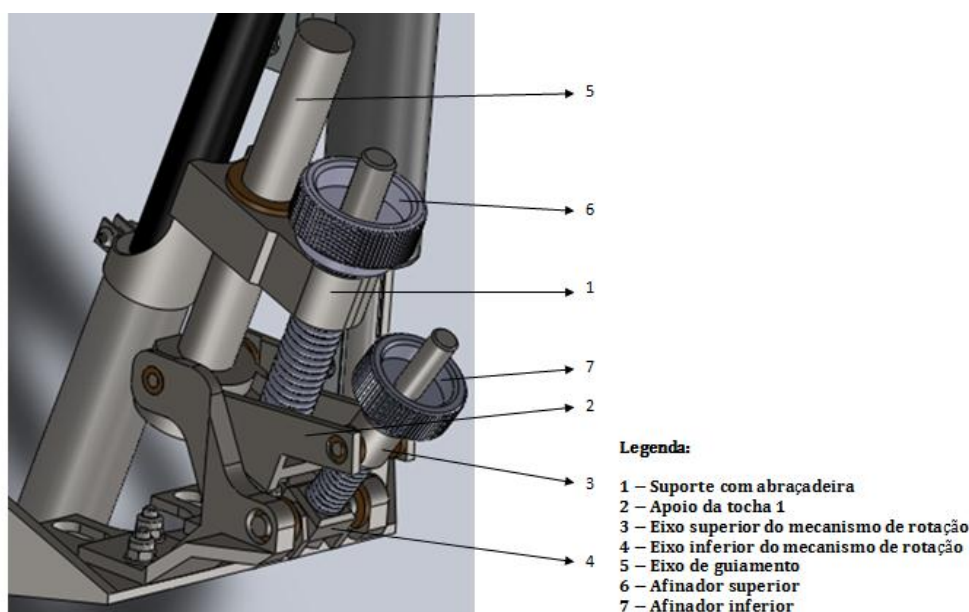


Figura 3.7: Sistema de ajuste de rotação e movimento axial da tocha

No mecanismo de movimento axial da tocha, ao apertar o afinador superior (6), o suporte com abraçadeira (1) aproxima-se do apoio da tocha 1 (2), deslizando pelo eixo de guiamento (5).

No mecanismo de movimento de rotação da tocha, ao apertar o afinador inferior (7), o eixo superior do mecanismo de rotação (3) aproxima-se do eixo inferior do mecanismo de rotação (4).

A força mínima das molas tem que ser suficiente para garantir que a tocha se mantém imóvel ao longo do percurso.

Este sistema utiliza em todos os veios casquilhos de bronze, para evitar a utilização de chumaceiras de rolamento, que ocupariam mais espaço, teriam maior peso e o seu custo seria mais elevado.

Serão utilizados parafusos de rosca métrica no lugar de fusos de movimento, porque as cargas transmitidas pelas molas de compressão helicoidais são de intensidade reduzida. Optou-se por utilizar rosca métrica porque este tipo de rosca garante maior precisão que os tipos de rosca geralmente utilizados em fusos de movimento (rosca quadrada, rosca trapezoidal ou rosca dente de serra).

As cabeças dos parafusos terão o movimento restringido pelos elementos de apoio da tocha, não sendo por isso necessário agarrar a cabeça dos parafusos aquando do ajuste do posicionamento da tocha. Para controlar o alongamento das molas em torno dos parafusos serão utilizadas porcas serrilhadas que funcionarão como afinadores manuais.

No mecanismo de rotação, ao apertar o afinador, a tocha aproximar-se-á do aro da porta. No caso do mecanismo de movimento linear da tocha, ao apertar o afinador, a tocha aproximar-se-á do cordão de soldadura.

Estes mecanismos serão ajustados por um operador no fim de cada volta em torno do aro, de modo a colocar a tocha na posição desejada para a passagem seguinte.

Para transmitir o momento de rotação à roda de tracção optou-se por um par de rodas dentadas accionado por um pequeno moto-reductor como mostra a Figura 3.8.

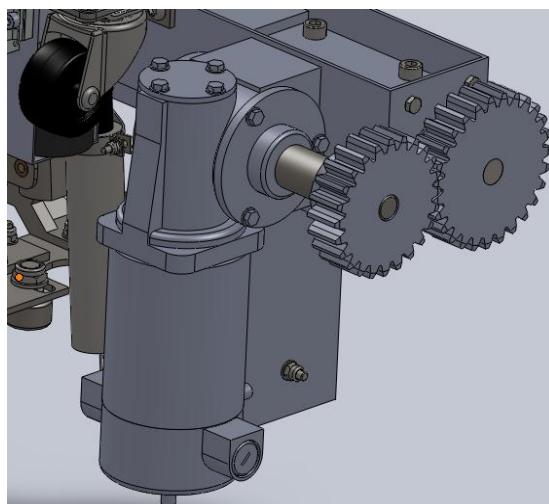


Figura 3.8: Moto-reductor e rodas dentadas

Optou-se por um moto-reductor de corrente DC com eixos perpendiculares, porque o moto-reductor com esta geometria pode ser fixado como mostra a figura anterior e assim baixa-se o centro de gravidade do conjunto e garante-se maior equilíbrio do dispositivo ao longo do processo. O moto-reductor terá um controlador que fará variar a velocidade no veio de saída.

A transmissão do momento de rotação será feita por intermédio de rodas dentadas, que garantem maior rendimento que soluções com correntes ou correias dentadas. Estas rodas dentadas serão do material delrin porque são mais leves, mas principalmente para não ser necessária lubrificação. As rodas dentadas serão fixadas por cavilhas elásticas e terão um caixa para proteger o operador e as próprias rodas dentadas das sujidades provenientes do ambiente industrial.

Como o diâmetro de saída do veio do moto-reductor é inferior ao diâmetro dos furos das rodas dentadas, será utilizada uma junta que fará esse aumento de diâmetro. Esta junta será montada no veio de saída do moto-reductor por intermédio de chaveta.

Todos os sistemas de fixação aparafusada usarão porcas com freio para não desapertarem com a vibração causada pelo motor.

As chumaceiras de rolamento utilizadas no apoio do veio de transmissão devem ser vedadas devido ao ambiente onde serão utilizados e não devem precisar de manutenção.

Os procedimentos da escolha das peças a adquirir e do dimensionamento das peças construídas serão descritos nos restantes subcapítulos deste capítulo.

3.3 Levantamento dos componentes existentes no mercado

Realizou-se um trabalho de pesquisa com o objectivo de encontrar os componentes existentes no mercado mais adequados para o dispositivo.

Neste subcapítulo descreve-se a estratégia de obtenção dos componentes existentes no mercado e de seguida apresentam-se os elementos a adquirir.

Sempre que possível optou-se por adquirir equipamentos apresentados no sistema métrico. Dos componentes seleccionados apenas as rodas da marca “Fairlane” e a roda da marca “Shepherd” não são apresentados no sistema métrico, seguindo o sistema imperial.

Foi tido em conta a relação preço/qualidade dos componentes a obter e optou-se também por favorecer as marcas que disponibilizavam a informação mais completa sobre os elementos.

Os elementos escolhidos serão apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Componentes a adquirir

Descrição	Marca
Mola de gás	Bansbach
Roda	Fairlane
Roda de rotação e translação	Shepherd
Chumaceira de rolamento	SKF
Esfera	
Chumaceira de rolamento linear	THK
Roda dentada	HPC
Veio de guiamento	
Casquilho	
Mola de compressão helicoidal	Flexo
Mola de torção	Lesjofors
Casquilho	HPC
Parafuso	Fabory
Porca	
Anilha	
Cavilha	
Chaveta	
Moto-reductor e controlador	Bodine Electric
Porca serrilhada	Halder

3.4 Escolha dos componentes a adquirir

Neste subcapítulo serão apresentados os componentes adquiridos pormenorizadamente.

3.4.1 Rodas

Serão adquiridas 4 rodas da marca Fairlane, de 3 modelos diferentes, adequadas a cada uma das funções.

O material da superfície das rodas escolhidas é neoprene e a dureza desse material será equivalente à dureza do pneu de um automóvel.

A principal razão para se ter optado por estas rodas foi a sua geometria (as rodas devem ter a superfície de contacto larga e lisa, e devido à geometria do dispositivo, o diâmetro exterior deve ser reduzido).

Não são dadas informações sobre a carga admissível das rodas, no entanto nas rodas que utilizam chumaceiras de rolamento, são estes os elementos que restringem a carga máxima, pelo que se pode assumir que todas as rodas aguentam a carga referente à carga admissível para as chumaceiras.

As chumaceiras de rolamento utilizadas são de duas carreiras de esferas que segundo a Fairlane aguentam as cargas apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Carga admissível para as chumaceiras das rodas Fairlane, em função da velocidade de rotação [20]

Carga (N)	Velocidade de rotação (min^{-1})
1900	50
1250	100
800	250
700	500
500	1000

Sendo o peso do dispositivo estimado em 150 N e a velocidade das rodas muito inferior a 50 min^{-1} , as rodas preenchem perfeitamente os requisitos.

As rodas escolhidas são as seguintes:

Fairlane RR-215-60-EX500



Figura 3.9: Roda Fairlane RR-215-60-EX500 [20]

Dimensões:

$$A = 38,10 \text{ mm} \quad B = 31,75 \text{ mm} \quad C = 12,70^{+0,127}_{+0,025} \text{ mm} \quad D = 22,35 \text{ mm} \quad E = 9,65 \text{ mm}$$

Esta roda (Figura 3.9) é responsável pelo deslocamento do dispositivo, sendo o elemento de ligação entre o veio de transmissão e o aro da porta.

Fairlane RR-215-60-C

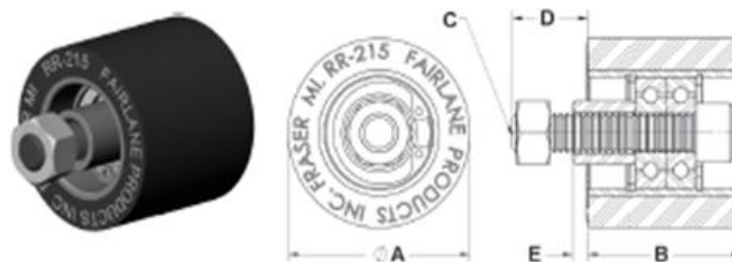


Figura 3.10: Roda Fairlane RR-215-60-C [20]

Dimensões:

$$A = 38,10 \text{ mm} \quad B = 31,75 \text{ mm} \quad C = 7,94 \text{ mm} \quad D = 16,00 \text{ mm} \quad E = 3,05 \text{ mm}$$

Estas rodas (Figura 3.10) são aplicadas na parte 3 do dispositivo e servem de apoio, tendo incluídos as chumaceiras de rolamento, eixos roscados e respectivas porcas.

Fairlane RR-215-60-B

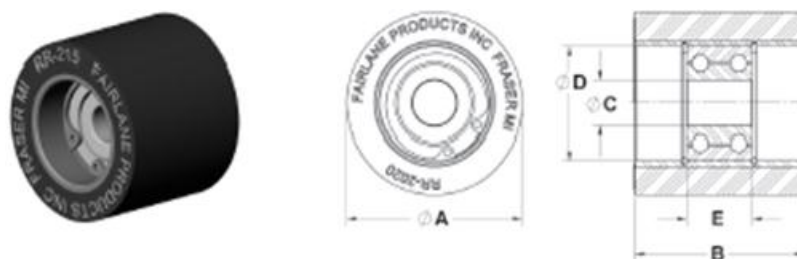


Figura 3.11: Roda Fairlane RR-215-60-B [20]

Dimensões:

$$A = 38,10 \text{ mm} \quad B = 31,75 \text{ mm} \quad C = 8^{+0,052}_{-0,050} \text{ mm} \quad D = 22,10 \sim 22,23 \text{ mm} \quad E = 12,65 \sim 12,75 \text{ mm}$$

Esta roda será montada no mecanismo tipo “suspensão” e tem as chumaceiras incluídas.

Shepherd PRE16 CO-3E

Será adquirida uma roda da marca Shepherd, com movimento de translação e rotação apresentadas na Figura 3.12.

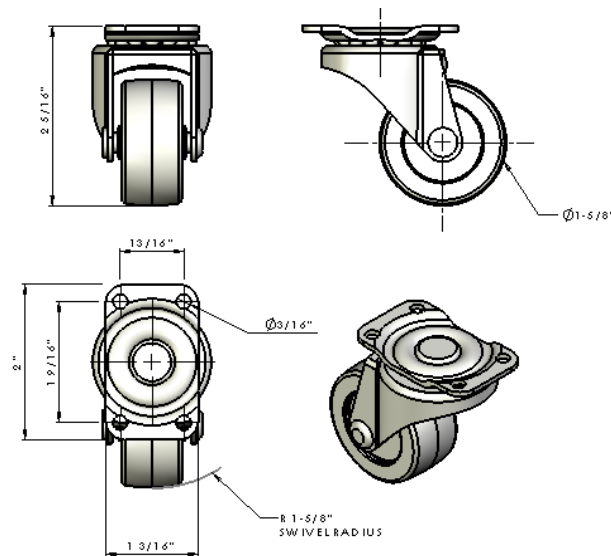


Figura 3.12: Roda Shepherd PRE16 CO-3E [21]

Esta roda será aplicada no chassis superior com o objectivo de manter o dispositivo equilibrado.

A roda é necessária para garantir o equilíbrio do dispositivo, uma vez que o centroide não está coincidente com o centro geométrico do dispositivo.

As especificações relevantes da roda da marca “Shepherd” apresentam-se de seguida:

Carga dinâmica admissível – 340 N

Diâmetro da roda – 41,28 mm

Material da roda - Poliolefina

A roda de translação será fixada ao dispositivo através de uma chapa (dimensionada na secção 3.6.4), sendo a fixação à chapa feita através de parafusos.

3.4.2 Moto-redutor e controlador

Sabe-se que a roda de tracção tem diâmetro de 38,1mm, e que a velocidade linear de progressão do dispositivo utilizando o processo de soldadura por fios fluxados com os parâmetro referidos anteriormente na Tabela 2.1, é cerca de 450 mm/min, pelo que:

Velocidade linear pretendida indicada na Tabela 2.1:

$$v = 450 \pm 22,50 \text{ mm/min}$$

onde:

v – velocidade linear do dispositivo.

Perímetro da roda de tracção:

$$Per = \pi \times \varnothing A = \pi \times 38,1 = 119,695 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

Per – Perímetro da roda de tracção, mm;

$\varnothing A$ – diâmetro da roda de tracção, mm.

Velocidade de rotação da roda:

$$n = \frac{v}{Per.} = \frac{450 \pm 22,50}{119,695} = 3,76 \pm 0,19 \text{ min}^{-1} \text{ (Eq. 3.2)}$$

onde:

n – velocidade de rotação da roda de tracção, min^{-1} .

O moto-redutor escolhido deve ter o veio de saída perpendicular ao motor para que a colocação do motor em relação ao chassis do dispositivo baixe o centro de gravidade do conjunto. O motor encontrado com menor momento de rotação que preenchesse os requisitos foi o modelo N1098 da Bodine Electric apresentado na Figura 3.13.



Figura 3.13: Moto-redutor Bodine Electric N1098 [22]

Da Tabela 3.3, onde se apresentam as especificações do moto-redutor, pode concluir-se que o moto-redutor escolhido transmite momento de rotação excessivo para o funcionamento do dispositivo. O momento de rotação em excesso podia trazer problemas apenas se por algum motivo a roda de tracção fosse bloqueada, no entanto todos os elementos estão dimensionados para suportar o momento de rotação máximo transmitido pelo moto-redutor.

Tabela 3.3: Especificações do moto-redutor N1098 [22]

Modelo	N1098
Velocidade de rotação (min^{-1})	43
Momento de rotação nominal (N.mm)	1800
Momento de rotação máximo (N.mm)	5200
Potência (W)	23
Tensão (V)	180
Intensidade de corrente (A)	0,18
Relação de transmissão	40
Carga Radial (N)	180
Peso (kg)	2,4

Será utilizado um controlador que faz variar a velocidade de saída do motor em função da variação da tensão de corrente, de 0 a 180V.

Segundo o fabricante, o controlador adequado ao moto-redutor escolhido é o modelo 1865 da Bodine Electric apresentado na Figura 3.14.



Figura 3.14: Controlador 1865 da Bodine Electric [22]

As especificações do controlador são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Especificações do controlador 1865 [22]

Modelo	1865
Potência a 180V (W)	248,6
Tensão de entrada (V)	230
Tensão de saída (V)	0 a 180
Intensidade de corrente de saída (A)	2,1
Pico da intensidade de corrente (A)	4,2
Factor de forma	1,4
Peso (kg)	3,6

Para que o dispositivo mantenha a velocidade uniforme pretendida é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$\frac{T}{r_{roda}} > Fa_{rolamento} \Leftrightarrow T > \mu_{rolamento} \times P \times r_{roda} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde:

T – Momento de rotação transmitido pelo moto – redutor, N. mm;

r_{roda} – raio da roda, mm;

$Fa_{rolamento}$ – Força de atrito de rolamento, N;

$\mu_{rolamento}$ – Coeficiente de atrito de rolamento;

P – Peso do dispositivo, N.

Assumindo que o coeficiente de atrito de rolamento ($\mu_{rolamento}$) da roda de neoprene é 0,005 e que o peso do dispositivo é 100N, da Eq. 3.3 tem-se:

$$T > 0,005 \times 100 \times 19,05 \Leftrightarrow T > 9,53 \text{ N. mm}$$

O momento de rotação necessário para acelerar o dispositivo desde 0 min⁻¹ até 37,6 min⁻¹ será:

$$F = m.a \Leftrightarrow F = m.\alpha.r_{\text{roda}} \Leftrightarrow T_{\text{arranque}} = m.\alpha.r^2 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde:

F – Força resultante, N;

m – Massa, kg;

a – Aceleração tangencial, m.s⁻²;

α – Aceleração angular, rad.s⁻²;

T_{arranque} – Momento de rotação mínimo para arrancar, N. mm.

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde:

ω_f – velocidade angular final, rad/s;

ω_i – velocidade angular inicial, rad/s;

Δt – intervalo de tempo, s.

Aplicando a Eq.3.4 na Eq.3.5 e sabendo que 3,76 min⁻¹ \approx 0,39 Rad/s , obtém-se:

$$T_{\text{arranque}} = m.\frac{\omega_f - \omega_i}{\Delta t}.r^2 \Leftrightarrow T = 10 \times \frac{0,39 - 0}{\Delta t}.19,05^2 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Onde:

T_{arranque} – Momento de rotação mínimo para o dispositivo arrancar, N. mm;

m – massa, kg;

ω_f – velocidade angular final, rad/s;

ω_i – velocidade angular inicial, rad/s.

Assumindo que pretendemos que o dispositivo atinja a velocidade pretendida em 10 segundos, temos:

$$T_{\text{arranque}} = 0,143 \text{ Nmm}$$

O momento de rotação máximo do motor permite arrancar sem que haja escorregamento da roda se:

$$F_{T_{\text{peak}}} < F_{a_{\text{estático}}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

onde:

$F_{T_{\text{peak}}}$ – Força referente ao momento de rotação máximo do moto – redutor, N;

$F_{a_{\text{estático}}}$ – Força de atrito estático, N.

$$\frac{T_{\text{peak}}}{r_{\text{roda}}} < \mu_{\text{estático}}.P \Leftrightarrow \frac{5,2}{0,1905} < \mu_{\text{estático}}.100 \Leftrightarrow \mu_{\text{estático}} > 0,273 \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde:

T_{peak} – Momento de rotação máximo do moto – redutor, N. mm.

Para evitar o escorregamento, o coeficiente de atrito estático entre as superfícies em contacto tem que ser maior que 0,273.

O veio de saída do motor escolhido tem 11 mm de diâmetro com tolerância h6. O veio traz escatel feito para fazer união enchavetada, como é indicado no desenho do motor apresentado em anexo.

3.4.3 Rodas dentadas

Serão utilizadas rodas dentadas da marca HPC fabricadas em material delrin, apresentadas na Figura 3.15.

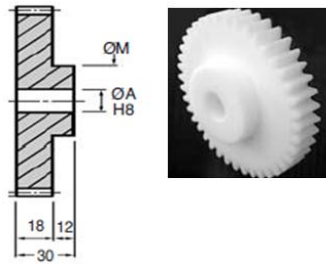


Figura 3.15: Roda dentada [23]

O material delrin é mais leve do que o aço e não precisa de lubrificação.

As rodas dentadas serão escolhidas tendo em conta que devem suportar o momento de rotação máximo transmitido pelo moto-reductor (5200 N.mm como apresentado na Tabela 3.3).

Para se conseguir ter a velocidade de rotação pretendida de $3,76 \text{ min}^{-1}$ podia-se aplicar um sistema de rodas dentadas com relação de transmissão $i = 43/3,76 = 11,43$, mas como o moto-reductor terá um controlador que faz variar a velocidade de saída em função da tensão de corrente, podemos optar por uma relação de transmissão menor e colocar o moto-reductor a funcionar num regime mais baixo.

Com o motor fixado directamente no chassis do dispositivo, a distância entre o veio do motor e o veio de transmissão é de 63,05 mm.

Pelo que a soma dos raios primitivos das rodas dentadas tem que ser maior ou igual a este valor. Se for maior terá que ser colocado um espaçador na união do motor ao chassis do dispositivo, aumentando assim a distância entre os veios.

$$|O1O2| = \frac{d_{p1} + d_{p2}}{2} \geq 63,05 \Leftrightarrow \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot m_{rd}}{2} \geq 63,05 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde:

$|O1O2|$ – distância entre – eixos, mm;

d_{p1} – diâmetro primitivo da roda dentada motora, mm;

d_{p2} – diâmetro primitivo da roda dentada movida, mm;

Z_1 – número de dentes da roda dentada motora

Z_2 – número de dentes da roda dentada movida

m_{rd} – módulo da rodas dentadas, mm.

Segundo o catálogo da HPC, as rodas dentadas com módulo 2,5 aguentam momentos de rotação até 11000 N.mm para rodas dentadas com 50 dentes. Por relação de diâmetros, para suportar o momento de rotação máximo (5200 N.mm) a roda dentada terá que ter no mínimo 23 dentes.

Utilizando a Eq. 3.9 tem-se:

$$\frac{(23 + Z_2) \cdot 2,5}{2} \geq 63,05 \Rightarrow Z_2 \approx 28 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Da análise do catálogo da HPC conclui-se que a maior roda dentada, com diâmetro do furo igual a 12 mm (ϕA na Figura 3.15), tem 27 dentes.

O diâmetro do furo tem que ser igual a 12 mm devido à dimensão da chumaceira de rolamento que se encontra depois da roda dentada, porque a chumaceira com diâmetro interior de 15 mm não caberia no chassis do dispositivo.

Utilizando a Eq. 3.9, tem-se:

$$|O1O2| = \frac{(Z_1 + 27) \cdot 2,5}{2} \geq 63,05 \Rightarrow Z_1 = 24 \wedge Z_2 = 27 \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Daqui conclui-se que é aconselhável que a roda dentada motora tenha 24 dentes e a roda dentada movida tenha 27 dentes.

Ficando a relação de transmissão:

$$i = Z_2/Z_1 = 27/24 = 1,125 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

onde:

i – Relação de transmissão

Sendo necessária uma distância entre eixos:

$$|O1O2| = \frac{(24 + 27) \cdot 2,5}{2} = 63,75 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Pelo que é necessário aplicar um espaçador entre o motor e o chassis do dispositivo com 0,7 mm de espessura.

As especificações das rodas dentadas escolhidas são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Especificações das rodas dentadas escolhidas [23]

Referências	Z	ϕP (mm)	ϕD (mm)	ϕM (mm)	ϕA (mm)	Peso (kg)
ZG2,5-24	24	60	65	36	12	0,077
ZG2,5-27	27	67,5	72,5	36	12	0,094

Como o veio de saída do moto-reductor tem 11 mm de diâmetro e, segundo o fornecedor (Bodine Electric), não pode ser alterado, optou-se por construir uma junta de ligação do diâmetro de 11 mm para 12 mm que será dimensionada no ponto 3.6.9.

Das várias hipóteses sugeridas pelo fabricante, optou-se por fazer a união das rodas dentadas por intermédio de cavilhas, como é apresentado na Figura 3.16.

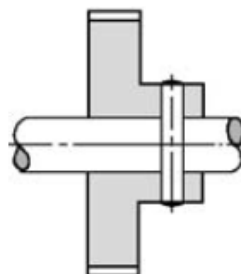


Figura 3.16: Acoplamento das rodas dentadas ao veio [23]

Segundo indicação do fornecedor (HPC), para um veio com 12 mm de diâmetro, aplicam-se cavilhas com 4 mm de diâmetro. Estas cavilhas serão apresentadas no ponto 3.4.11 juntamente com os restantes elementos de fixação.

3.4.4 Chumaceiras de rolamento

Os esforços axiais actuates no sistema são desprezáveis quando comparados com os esforços radiais, por isso as chumaceiras de rolamento rígidos de esferas de contacto radial são o tipo de apoio mais adequado.

Serão escolhidas chumaceiras com vedantes em ambos os lados para evitar que entrem poeiras, pois funcionarão em ambiente industrial, evitando assim a necessidade de haver manutenção.

A escolha das dimensões das chumaceiras será feita em função das dimensões dos outros componentes.

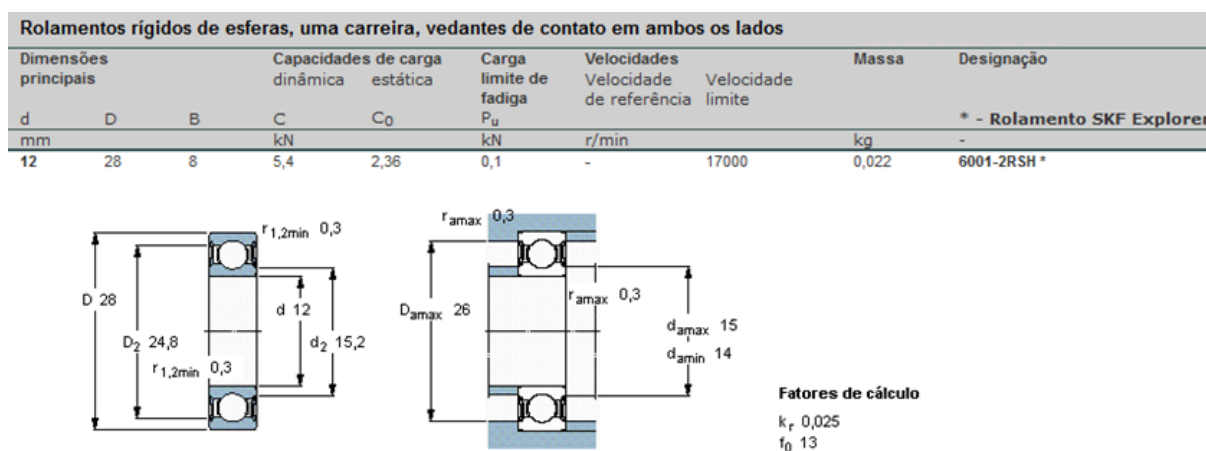


Figura 3.17: Chumaceira de rolamento escolhida [24]

Análise da vida útil das chumaceiras de rolamento, com uma confiabilidade de 99%, assumindo uma carga equivalente de 150 N e uma velocidade de 4 min⁻¹, apresentada na Figura 3.18, indica que as chumaceiras terão uma vida útil de 40824000 horas.

The screenshot shows the Solidworks 2010 Bearing Wizard interface. On the left, a diagram of a radial ball bearing is shown. Below it, the 'Units' are set to SI, and the 'SKF' catalog is selected. A list of bearing models is shown, with '6001' selected. On the right, the 'Reliability' is set to L(1) = 99%. The 'Capacity' section has 'Rated' selected. The 'Load' section shows an 'Equivalent Load' of 150 N. The 'Basic Life' section shows 'Life in Revs' as 9797.760000 x 10⁶ Revs, 'Speed' as 4 r/min, and 'Life in hours' as 40824000.0000 hrs. A 'Solve Life' button is visible.

Parameter	Value	Unit
Reliability	L(1) = 99%	
Capacity	Rated	
Bore	12	mm
OD	28	mm
# Balls	10	
Ball Diameter	4.800000	mm
Capacity	5400	N
Load	Equivalent Load	150 N
Basic Life	Life in Revs	9797.760000 × 10 ⁶ Revs
Speed	4	r/min
Life in hours	40824000.0000	hrs

Figura 3.18: Análise de vida útil das chumaceiras de rolamento calculada em Solidworks 2010

3.4.5 Chumaceiras lineares

Serão utilizados duas chumaceiras lineares, com um patim cada, para dar maior rigidez ao conjunto (mola de gás/chumaceiras lineares)

Os patins serão fixados ao chassis do dispositivo e as guias deslocar-se-ão ao longo dos patins.

A Figura 3.19 apresenta as direcções dos momentos que podem ser aplicados nas chumaceiras de rolamento linear.

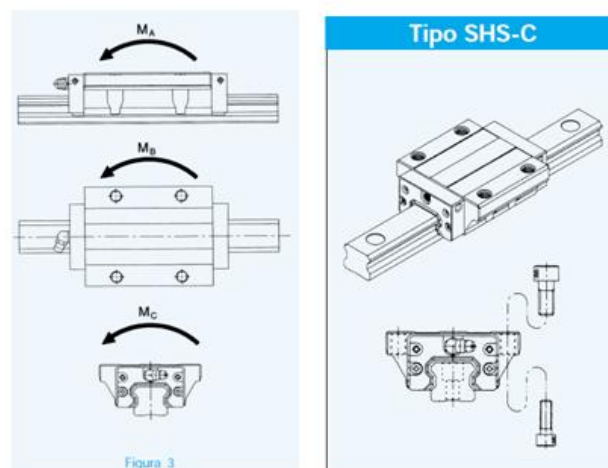


Figura 3.19: Chumaceira linear THK SHS15-C [25]

Os momentos presentes na Tabela 3.6 serão usados para dimensionar a chapa que une as chumaceiras lineares à mola de gás (secção 3.6.2).

Tabela 3.6: Momentos suportados pela chumaceira linear [25]

Direcção Modelo	Ma (N.m)		Mb (N.m)		Mc (N.m)
	Um patim	Dois patins	Um patim	Dois patins	Um patim
SHS15	150	790	150	790	170

É necessário garantir que é utilizado um critério de igual resistência, para que a probabilidade de ruir de cada um dos elementos seja a mesma.

Devido às dimensões do dispositivo, a distância medida entre a ponta da guia e o centro do patim é no máximo 237,91 mm.

$$M = F.L \quad (\text{Eq. 3.14})$$

onde:

M – *Momento de força resultante*, N.mm;

F – *Força resultante*, N;

L – *Braço*, mm.

Da aplicação da Eq. 3.14 e sabendo que os momentos são $Ma = 150 \text{ N.m}$ e $Mb = 150 \text{ N.m}$ (Tabela 3.6), obtém-se $Fa = 630,49 \text{ N}$ e $Fb = 630,49 \text{ N}$.

3.4.6 Mola de gás

A mola tem que ter curso suficiente para que a tocha se mantenha junto ao cordão de soldadura ao longo da trajetória do dispositivo em qualquer um dos modelos de aro e de torre metálica.

Na Figura 3.20 apresenta-se o desenho do aro da porta.

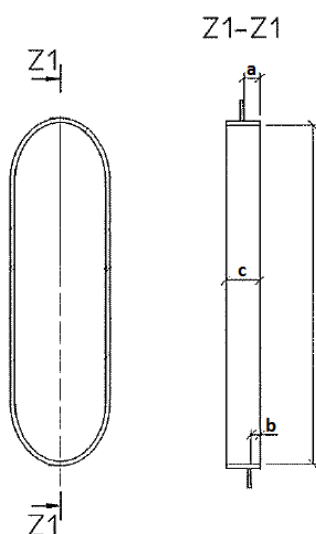


Figura 3.20: Representação da diferença de cotas ao longo do aro da porta devido à conicidade da torre metálica [18]

Na Tabela 3.7 apresentam-se os valores das dimensões relevantes para determinar o curso da mola de gás, necessário para realizar o processo de soldadura em qualquer um dos modelos de torre e aros de portas.

Tabela 3.7: Dimensões da montagem do aro na torre (mm) [18]

	Torre tipo A	Torre tipo B	Torre tipo C	Torre tipo D	Torre tipo E
t (Espessura da torre)	24	32	36	38	52
a (ver a Figura 3.20)	154	144	148	138	179
b (ver a Figura 3.20)	70	84	79	82	117
c (altura do aro)	300	300	300	300	400
d = (c-(t+a))	122	124	116	124	169
e = (c-(t+b))	206	184	185	180	231

Para o dispositivo conseguir realizar o processo de soldadura do aro da porta, tanto pelo lado interior como pelo lado exterior da torre, é necessário obter a variação máxima da distância medida entre a roda de tracção e a torre eólica para os diferentes modelos de torres e de aros de portas. Analisando a Tabela 3.7 obtém-se o valor máximo e o valor mínimo desta distância.

$$L_{mola} = \text{Max}(a, b, d, e) - \text{Min}(a, b, d, e) = 231 - 70 = 161\text{mm} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

onde:

L_{mola} – Curso mínimo necessário da mola de gás, mm.

A mola de gás escolhida tem 180 mm de curso e uma força máxima de 30 N e é apresentada na Figura 3.21.

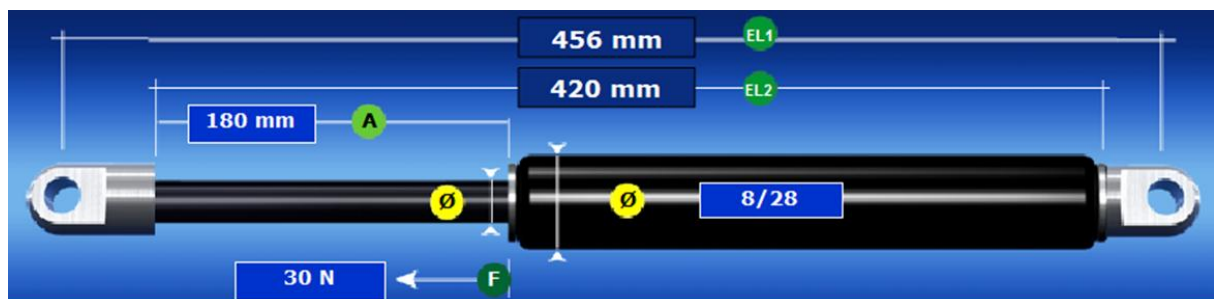
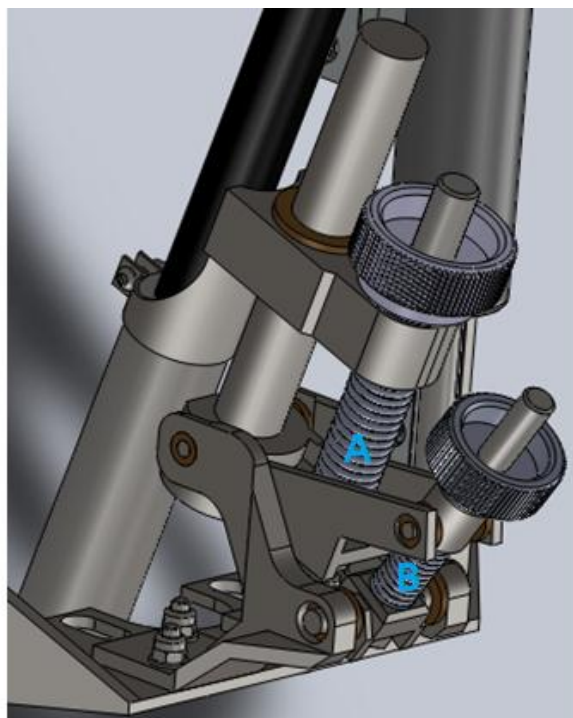


Figura 3.21: Mola de gás Bansbach [26]

A força exercida pela mola é suficiente para manter as esferas junto à torre ao longo do processo de soldadura.

3.4.7 Molas de compressão helicoidais

São necessárias duas molas de compressão helicoidais, uma para o mecanismo de rotação da tocha e outra para o mecanismo de movimento axial da tocha.



Legenda:

A – Mola de compressão helicoidal do mecanismo de movimento axial da tocha

B – Mola de compressão helicoidal do mecanismo de movimento de rotação da tocha

Figura 3.22: Posicionamento das molas de ajuste da tocha

As molas têm que ter força suficiente para garantir que a tocha se mantém imóvel ao longo do processo de soldadura.

Da análise dimensional conclui-se que para a tocha percorrer toda a junta de soldadura, a mola do mecanismo de movimento axial da tocha funcionará entre os 47 mm e os 98 mm de comprimento.

A força mínima aplicada pela mola tem que ser superior ao peso da tocha. As especificações da mola escolhida são apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Características da mola helicoidal de compressão 1 [27]

Mola de compressão 1						
Diâmetro exterior	Diâmetro interior	Diâmetro do arame	Comprimento em repouso	Comprimento sólido	Número de espiras	Constante de elasticidade
mm	mm	mm	mm	mm	aproximad.	N/mm
14,9	11,2	1,83	127	45	24,6	2,2

A força realizada pela mola calcula-se por:

$$F_{\text{elast}} = k \times \Delta x \quad (\text{Eq. 3.16})$$

onde:

F_{elast} – Força da mola helicoidal, N;
 K – Constante de elasticidade da mola helicoidal, N/mm;
 Δx – Alongamento da mola helicoidal, mm.

Aplicando a Eq. 3.16, tem-se:

$$F_{\min} = 2,20.(127 - 98) = 63,8N \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$F_{\max} = 2,20.(127 - 47) = 176,0N \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Da análise dimensional conclui-se que para a tocha percorrer toda a junta de soldadura, a mola do mecanismo de rotação da tocha funcionará entre os 62 mm e os 25,4 mm de comprimento.

A força mínima aplicada pela mola tem que manter a tocha com o mesmo posicionamento ao longo do percurso realizado pelo dispositivo. As especificações da mola escolhida são apresentadas na

Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Características da mola helicoidal de compressão 2

Mola de compressão 2						
Diâmetro exterior	Diâmetro interior	Diâmetro do arame	Comprimento em repouso	Comprimento sólido	Número de espiras	Constante de elasticidade
mm	mm	mm	mm	mm	aproximad.	N/mm
11,1	8,7	1,22	88,9	25,4	20,8	1,21

Aplicando a Eq. 3.16 tem-se:

$$F_{\min} = 1,21.(88,9 - 62) = 32,5N \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$F_{\max} = 1,21.(88,9 - 25,4) = 76,8N \quad (\text{Eq. 3.20})$$

As molas escolhidas deverão ser suficientes para garantir que a tocha se mantém na mesma posição ao longo de cada passagem, no entanto, como a força exercida pela tocha depende do peso da tocha e da colocação do tubo de alimentação, as molas deverão ser um dos elementos a testar durante a fase experimental do dispositivo.

3.4.8 Molas de torção

As molas de torção serão inseridas no mecanismo baseado no sistema de suspensão de triângulos sobrepostos.

Foi seguido um processo iterativo para se conseguir encontrar a mola adequada ao funcionamento do dispositivo, tendo em conta o diagrama de corpo livre (Figura 3.23).

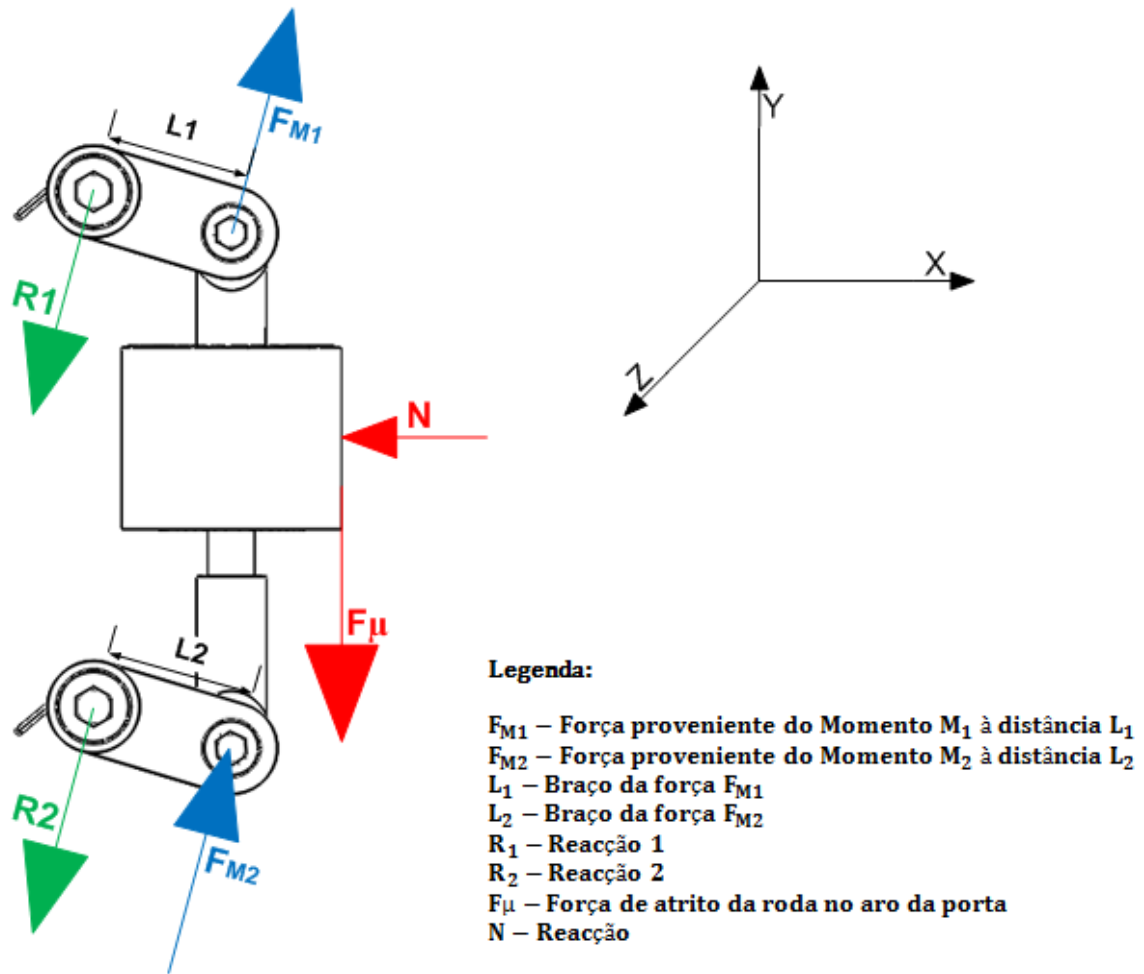


Figura 3.23: Diagrama de corpo livre da suspensão

O Momento da mola 1 (M_1) e o Momento da mola 2 (M_2) originam a força F_{M1} à distância L_1 e a força F_{M2} à distância L_2 , respectivamente.

$$M_1 = F_{M1} \cdot L_1 \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$M_2 = F_{M2} \cdot L_2 \quad (\text{Eq. 3.22})$$

onde:

M_1 – Momento provocado pela mola de torção 1, N. mm;

M_2 – Momento provocado pela mola de torção 2, N. mm;

F_{M1} – Força proveniente do momento M_1 , N;

F_{M2} – Força proveniente do momento M_2 , N;

L_1 – Braço da força F_{M1} , mm.

L_2 – Braço da força F_{M2} , mm.

$$FM_1x = FM_1 \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 3.23})$$

$$FM_1y = FM_1 \cdot \sin(\theta) \quad (\text{Eq. 3.24})$$

$$FM_2x = FM_2 \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 3.25})$$

$$FM_2y = FM_2 \cdot \sin(\theta) \quad (\text{Eq. 3.26})$$

onde:

θ – ângulo entre os tirantes da suspensão e a horizontal, °.

$$\sum Fx = 0 \Leftrightarrow FM_1x + FM_2x - N = 0 \quad (\text{Eq. 3.27})$$

$$\sum Fy = 0 \Leftrightarrow FM_1y + FM_2y - F\mu = 0 \quad (\text{Eq. 3.28})$$

onde:

$F\mu$ – Força de atrito da roda no aro da porta, N;

N – Reacção normal, N.

A roda deslocar-se-á nas direcções y+ e x+ até que as forças F_{M1} e F_{M2} provenientes dos momentos aplicados pelas molas de torção M_1 e M_2 , respectivamente, sejam igualadas pela reacção N e pela força de atrito $F\mu$. Quando isto acontecer, as reacções R_1 e R_2 terão o mesmo valor de F_{M1} e F_{M2} , respectivamente.

As reacções originam uma força no chassis do dispositivo nas direcções y- e x- o que fará com que o dispositivo mantenha a distância horizontal ao longo do movimento do dispositivo e terá também tendência a forçar o contacto da roda de tracção com o aro através da força na direcção y-.

Da Figura 3.23 conclui-se que quanto maior o valor de θ (ângulo entre $L1$ e a horizontal), maior será a componente em x da força e conseqüentemente menor será a componente em y.

A Figura 3.24 contém o diagrama de corpo livre do dispositivo de soldadura.

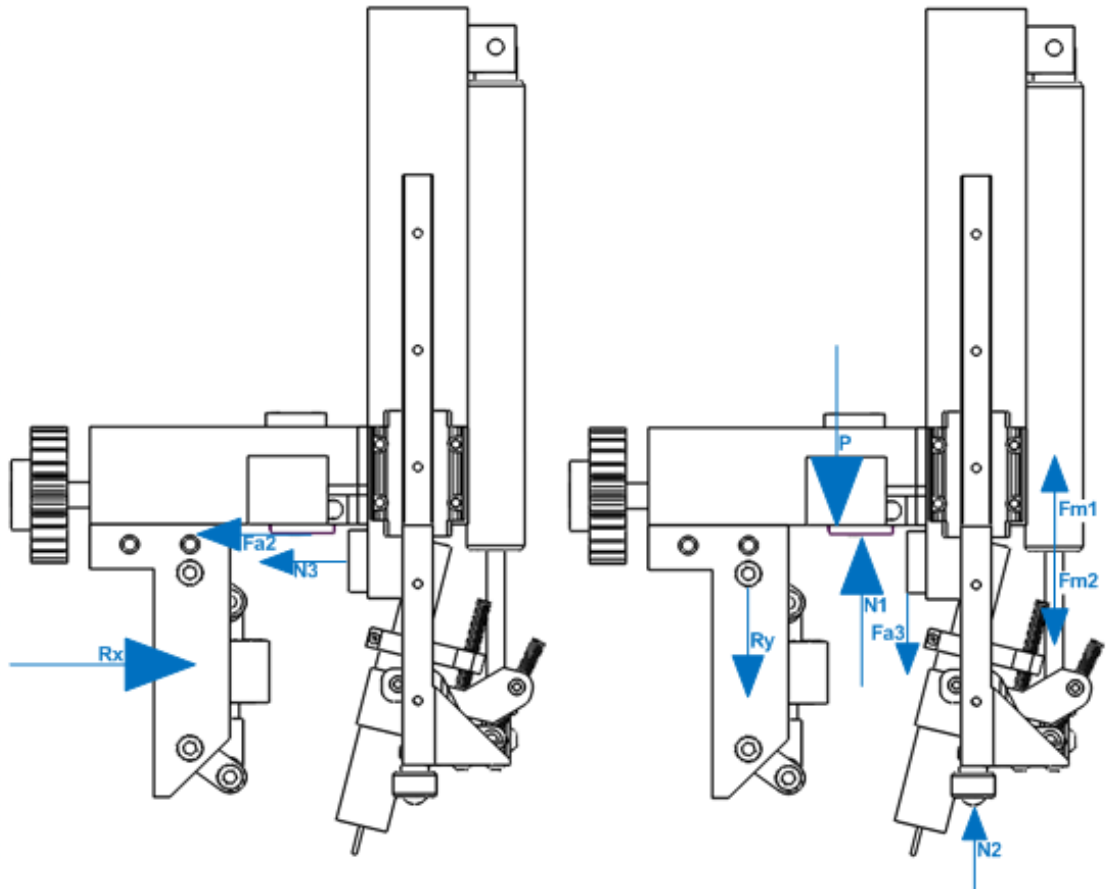


Figura 3.24: Diagrama de corpo livre do dispositivo

Do diagrama de corpo livre da Figura 3.24 conclui-se:

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow N_3 - Fa_2 - Rx = 0 \quad (\text{Eq. 3.29})$$

onde:

N_3 – Reacção do aro à força das rodas D e E, N;

Fa_2 – Força de atrito entre a superfície da roda de tracção e o aro da porta, N;

Rx – Componente em x da reacção provocada pelo sistema de suspensão, N.

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow N_1 + Fm_1 + N_2 - Fm_2 - P - Ry - Fa_3 = 0 \quad (\text{Eq. 3.30})$$

onde:

N_1 – Reacção do aro à roda de tracção, N;

Fm_1 – Força da mola de gás ascendente, N;

N_2 – Reacção da superfície da torre metálica às esferas, N;

Fm_2 – Força da mola de gás descendente, N;

P – Peso do dispositivo, N;

Ry – Componente em y da reacção provocada pelo sistema de suspensão, N;

Fa_3 – Força da atrito entre as rodas D e E e a superfície do aro, N.

como:

$$N_2 - Fm_2 = 0 \quad (\text{Eq. 3.31})$$

tem-se:

$$\sum Fy = 0 \Leftrightarrow N_1 + Fm_1 - P - Ry - Fa_3 = 0 \quad (\text{Eq. 3.32})$$

Da análise do diagrama de corpo livre da Figura 3.24 conclui-se que para o dispositivo estar encostado ao aro da porta é necessário:

$$Rx > Fa_2 \Leftrightarrow Rx > \mu \times N_1 \quad (\text{Eq. 3.33})$$

e,

$$N_3 > 0$$

Da Eq. 3.32, assumindo $P = 150 \text{ N}$ e sabendo que $Fm_1 = 30 \text{ N}$ tem-se:

$$N_1 = P + Ry + Fa_3 - Fm_1 = 150 + Ry + 0 - 30$$

Substituindo a Eq. 3.32 na Eq. 3.33 tem-se:

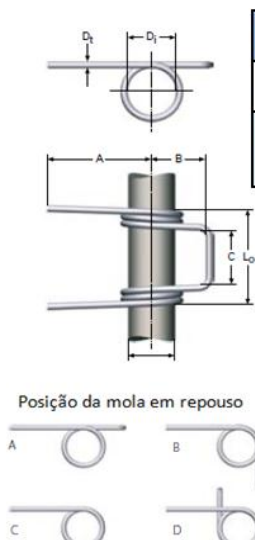
$$Rx > \mu \times (150 + Ry + 0 - 30) \quad (\text{Eq. 3.34})$$

Assumindo o coeficiente de atrito estático durante a rotação da roda de neoprene no aço é de $\mu=0,1$:

$$Rx > 12 + 0,1Ry \quad (\text{Eq. 3.35})$$

Foram escolhidas as molas apresentadas na Tabela 3.10, tendo em conta a dimensão dos eixos onde são aplicadas e a gama de momentos que podem transmitir. De seguida estudou-se qual a melhor solução.

Tabela 3.10: Características das molas de torção [28]



Dt	Di	Diâmetro do eixo	Número de espiras	Posição da mola	A	B	C	L0	Mn	φ	kt	Cat.nº
mm	mm	mm			mm	mm	mm	mm	N.mm	º	N.mm/º	
1,25	9	8	3	A	40	12	11	21	476	57	8,42	8569
1,5	12	10	3	A	45	16	13	25	800	60	13,26	8576
2	14	12	3	A	60	18	16	32	1830	52	35,38	8583

Legenda:
Dt – Diâmetro do arame
Di – Diâmetro interior
n_v – Número de espiras
A – Comprimento da perna
B – Comprimento do aro
C – Largura do aro
L₀ – Comprimento
Mn – Momento de rotação máximo
 φ – Ângulo de rotação máximo
k – Constante de elasticidade

Da análise dimensional conclui-se que os componentes do sistema permitem o ângulo máximo dos tirantes em relação à horizontal de $\theta_{\text{máx}}=66.41^\circ$.

A Figura 3.25 representa o posicionamento dos tirantes em relação à horizontal.

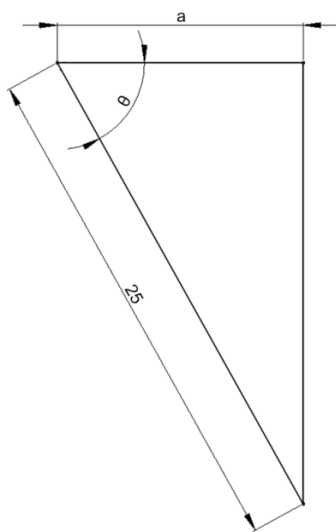


Figura 3.25: Posicionamento dos tirantes de suspensão em relação à horizontal

Na Tabela 3.11 apresentam-se os valores de θ para diferentes afastamentos entre as rodas, e a variação dos valores dos momentos aplicados em função de θ .

Tabela 3.11: Variação dos momentos aplicados ao longo do curso da suspensão

Afastamento das rodas (mm)	θ (°)	a (mm)	Mmola1 máx (N.mm)	Mmola2 máx (N.mm)	Mmola3 máx (N.mm)	$\Delta\theta$ (°)
43	55,92	14,01	391,61	656,50	1468,62	10,49
44	58,64	13,01	414,52	692,57	1564,86	7,77
45	61,29	12,01	436,83	727,71	1658,61	5,12
46	63,87	11,01	458,55	761,92	1749,89	2,54
47	66,41	10,01	479,94	795,60	1839,76	0

As forças apresentadas na Tabela 3.12 são provenientes do momento aplicado em cada mola. Como o sistema tem duas molas, as forças transmitidas ao dispositivo são o dobro das apresentadas na tabela.

Tabela 3.12: Variação das forças aplicadas ao longo do curso da suspensão

Afastamento das rodas (mm)	F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	Fx1 (N)	Fy1 (N)	Fx2 (N)	Fy2 (N)	Fx3 (N)	Fy3 (N)
43	15,66	26,26	58,74	12,97	8,78	21,75	14,71	48,66	32,92
44	16,58	27,70	62,59	14,16	8,63	23,66	14,42	53,45	32,57
45	17,47	29,11	66,34	15,33	8,39	25,53	13,98	58,19	31,87
46	18,34	30,48	70,00	16,47	8,08	27,36	13,42	62,84	30,83
47	19,20	31,82	73,59	17,59	7,68	29,16	12,74	67,44	29,45

É essencial que a componente em x da força seja elevada de modo a garantir que a roda exterior do dispositivo se mantém sempre em contacto com a superfície do aro da porta. É importante que a

componente em y da força exista para aumentar a força de contacto da roda de tracção, no entanto não pode ser muito elevada, para não desequilibrar o dispositivo.

A força F_x tem que ser suficiente para encostar o dispositivo de maneira a manter a distância horizontal da tocha constante. Para isso é preciso vencer a força de atrito estático entre as superfícies da roda de tracção de neoprene e aço. No entanto esta força de atrito será menor devido ao movimento de rotação da roda.

Da análise da Tabela 3.11 e da Tabela 3.12 podemos concluir que todas as molas respeitam a Eq. 3.35 em todo o curso das molas.

No entanto é difícil concluir se o coeficiente de atrito assumido ($\mu=0,1$) é alto ou baixo. Pelo que este elemento deve ser cuidadosamente analisado aquando da fase de testes do dispositivo.

Na Figura 3.26 apresenta-se o posicionamento das molas entre as cargas permitidas de modo a garantir que a força na direcção x é máxima.

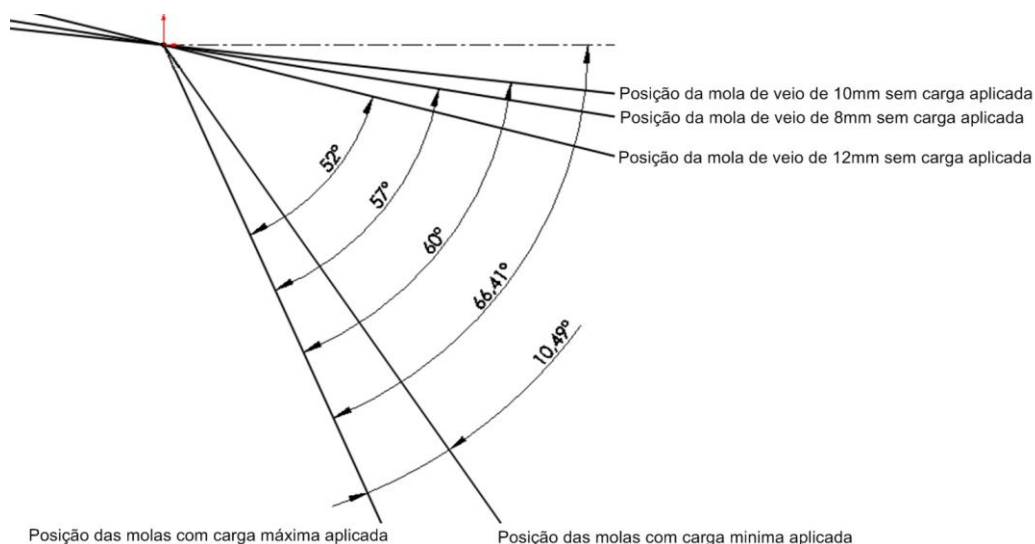


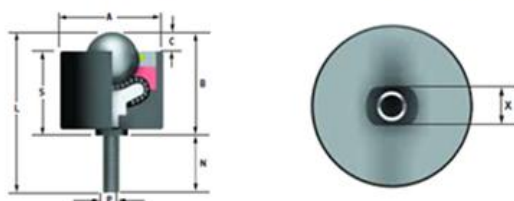
Figura 3.26: Posicionamento das molas no curso pretendido

3.4.9 Esferas

Serão usadas duas esferas com características apresentadas na Tabela 3.13, estas esferas têm que ter diâmetro para ficarem o mais próximo possível da tocha.

Tabela 3.13: Características da esfera [29]

Ref nº	Diâmetro da esfera	Peso	Dimensões							Carga admissível
			A	B	C	L	N	S	P	
	mm	kg	mm							N
7106	12,7	0,042	20,6	19,6	3,5	35,8	16,2	16,1	M8	350



Optou-se pela esfera 7106 da SKF, porque tem as dimensões necessárias e a carga máxima admissível (350 N) é suficiente para o funcionamento do dispositivo.

3.4.10 Casquilhos

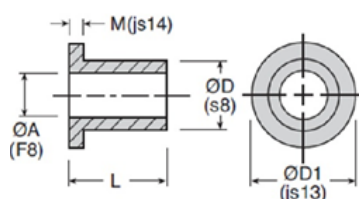
Os casquilhos que são utilizados como apoios, são a solução escolhida porque garantem pouco atrito entre as superfícies em contacto, em movimentos rotativos ou axiais.

Em vez de chumaceiras de rolamento, optou-se por utilizar chumaceiras de atrito (casquilho de bronze). Esta escolha deveu-se principalmente ao menor custo e ao menor espaço ocupado.

Serão utilizados 15 casquilhos de 5 modelos diferentes fornecidos pela HPC, 8 no mecanismo tipo “suspensão” e 7 nos mecanismos de ajuste da tocha.

Tabela 3.14: Características dos casquilhos escolhidos [23]

Referências	ϕA (F8)	ϕD (s8)	L	$\phi D1$ (js13)	M (js14)
mm					
METC4-8-4	4	8	4	12	2
METC6-10-6	6	10	6	14	2
METC8-12-8	8	12	8	16	2
METC8-12-12	8	12	12	16	2
METC16-20-20	16	20	20	24	2



Casquilho de bronze

- Material: Bronze BP 25 (FU-E10-62)
- Carga estática máxima: 20N/mm²
- Carga dinâmica máxima: 20N/mm²
- Velocidade linear máxima: 6m/s
- Temperaturas de utilização: -5°C a 90°C

Segundo o fabricante, os casquilhos devem ser inseridos em caixas com tolerância H7 e nos veios com tolerância f7.

3.4.11 Elementos de fixação

Para fixar todos os elementos do dispositivo são necessários 47 parafusos, 45 porcas, 49 anilhas, 3 cavilhas e 1 chaveta. As especificações destes elementos são apresentadas nas seguintes tabelas.

Tabela 3.15: Cavilhas utilizadas na montagem do dispositivo [29] [30]

Cavilhas elásticas ISO 8752		
Desenho técnico	Especificação técnica	
	Utilização	1 2
	L	12 36
	a (min)	0,35 0,65
	s	0,4 0,8
	d1	2,3<d1<2,4 4,4<d1<4,6
	d2	1,5 2,8
	dfuro	2 4
Utilização 1	Uma cavilha para fixar as duas partes do veio da "suspensão"	
Utilização 2	Duas cavilhas para fixar as rodas dentadas	

Tabela 3.16: Chaveta utilizada na montagem do dispositivo [29] [30]

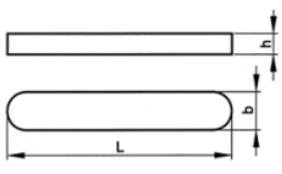
Chaveta ISO R773	
Desenho técnico	Especificação técnica
	Diâmetro eixo $10 < D \leq 12$
	h 4
	b 4
	L 20
Utilização	Fixar a junta ao veio de saída do moto-redutor

Tabela 3.17: Parafusos, anilhas e porcas utilizados na montagem do dispositivo [29] [30]

Qtd.	Diâmetro		Norma	l (mm)	l rosca (mm)		Norma		Norma	Utilização
1	M3	Parafusos	ISO7380	14	Total	Anilhas	ISO7089	Porcas	ISO10511	Aperto da tocha
4	M4		ISO7380	16	Total		ISO7089		ISO7040	Suportes da tocha
12	M4		ISO4762	20	Total		ISO7089		ISO7040	Rolamento lineares
2	M6		ISO7380	20	Total		ISO7089		ISO7040	Chassis exterior
2	M6		ISO4762	20	Total		ISO7089		ISO7040	Chassis exterior
4	M4		ISO7380	12	Total		ISO7089		ISO7040	Roda Shepherd
2	M6		ISO7380	16	Total		ISO7089		ISO7040	Chapa Roda Shepherd
4	M6		ISO4762	45	24		ISO7089		ISO7040	Corpo interior
2	M4		ISO4017	12	Total		ISO7089		ISO7040	Protector rodas dentadas
4	M6		ISO4762	16	Total					Moto-redutor
2	M6		ISO7379	60 (71)	11		ISO7089		ISO7040	Suspensão ao chassis
2	M6		ISO7379	30 (41)	11		ISO7089		ISO7040	Suspensão ao veio
4	M6						ISO7089			Espaçadores suspensão
2	M8						ISO7089		ISO10511	Esferas
1	M8		ISO4017	80	Total		ISO7089		DIN6303	Ajuste da tocha
1	M10		ISO4017	100	Total		ISO7089		DIN6303	Ajuste da tocha 2
2	M8		ISO7380	30	Total		ISO7089		ISO7040	Mola de gás
2	M4		ISO7380	16	Total		ISO7089		ISO7040	Suportes mola de torção

As porcas que fixam as rodas ao chassis não estão incluídas nesta tabela porque são fornecidas pela “Fairlane” juntamente com as rodas.

3.4.12 Fusos de movimento e porcas

Para fazer o ajuste do posicionamento da tocha serão utilizados parafusos de rosca métrica, porque a dimensão do passo desta rosca garante maior precisão que as roscas geralmente utilizadas em fusos de movimento (rosca quadrada ou outras especiais).

Os parafusos utilizados serão parafusos sextavados DIN 933 com a cabeça fixada, para que não seja necessário prender a cabeça quando se realiza o ajuste do posicionamento da tocha.

No lugar de porcas serão utilizados afinadores roscados para ser mais fácil realizar o ajuste da tocha entre passagens.



Figura 3.27: Afinador roscado DIN 6303 [31]

Estes elementos foram apresentados anteriormente no ponto 3.4.11 juntamente com os restantes elementos de fixação.

3.4.13 Eixo de guiamento

O eixo de guiamento escolhido é fornecido pela HPC e é apresentado na Figura 3.38.

Material: Aço calibrado

Dureza: 9HRC

Resistência à tracção: 700 – 850N/mm²

Estado da superfície: 0,6µm

Composição química (%)		
		Análise típica
C	0,95/1,25	1,13
Si	0,40 max.	0,22
Mn	0,25/0,45	0,37
P	0,045 max.	0,014
Si	0,045 max.	0,018
Cr	0,35/0,45	0,43

Referência	ØD
RSH160	16 ⁰ _{-0,015}

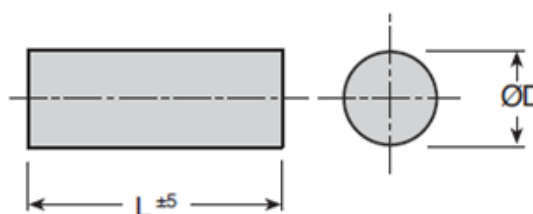


Figura 3.28: Eixo de guiamento escolhido [23]

O eixo será fornecido com 333 mm e posteriormente será cortado, ficando com um comprimento final de 130 mm.

Este eixo terá um movimento relativo face ao casquilho METC 16-20-20 apresentado anteriormente e será fixado num dos elementos do conjunto responsável pelo suporte e movimento da tocha. Tendo por isso um ajustamento com folga na união Eixo de guiamento/Casquilho e um ajustamento com aperto a frio na união Eixo de guiamento/Suporte.

3.5 Escolha dos materiais para as peças a construir

Todos os elementos dimensionados no capítulo 3.6 serão construídos com o aço DIN CK45.

O aço DIN CK45 é um aço de construção carbono facilmente maquinável e apresenta uma tensão de rotura suficiente para as solicitações previstas. As especificações do aço encontram-se em anexo [32].

Este aço apresenta as seguintes características:

- Tensão de rotura $\sigma_r = 700 \text{ N/mm}^2$;
- Tensão de cedência $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$;
- Módulo de elasticidade $E = 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$.

3.6 Dimensionamento das peças construídas

Neste subcapítulo serão dimensionados os elementos construídos tendo em conta que funcionarão em conjunto com as peças adquiridas.

O dimensionamento do dispositivo consiste num processo iterativo de dimensionamento de cada um dos elementos do conjunto, tendo em conta as peças adquiridas e o posicionamento destas.

O dispositivo não pode ser muito pesado para poder ser colocado no aro por operadores, porém não pode ser excessivamente leve para que a roda de tracção se mantenha em contacto com o aro da porta, sendo necessário para isso que a diferença entre o peso do dispositivo e a força de reacção da mola de gás seja positiva e com valor suficiente para gerar uma força que garanta que o do dispositivo progride sem escorregamento.

Alguns dos elementos estão sobredimensionados devido à necessidade de escolher elementos com dimensões compatíveis, e principalmente por se ter optado por, sempre que possível, adquirir peças existentes no mercado em vez de se construir.

Para o dimensionamento dos elementos do dispositivo de soldadura utilizaram-se coeficientes de segurança baseados nas características de materiais, natureza e intensidade de solicitações em serviço a que esse material estará sujeito.

O critério seguido na escolha dos coeficientes de segurança apresenta-se de seguida:

Coeficiente de segurança do material, FS1:

Materiais dúcteis/Estrutura uniforme, por exemplo aço ou alumínio -> 1 ~ 2

Materiais frágeis, por exemplo ferro fundido -> 2~3

Coeficiente de segurança relativo ao carregamento, FS2:

Carga gradualmente aplicada -> 1

Carga subitamente aplicada -> 2

Choques -> 3 ~ 5

O coeficiente de segurança total será, portanto:

$$FS = FS1 \times FS2 \quad (\text{Eq. 3.36})$$

onde:

FS – Coeficiente de segurança total

FS1 – Coeficiente de segurança do material

FS2 – Coeficiente de segurança relativo ao carregamento

E a tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = \sigma_c / FS \quad (\text{Eq. 3.37})$$

onde:

σ_c – Tensão de cedência do material, N/mm²;

σ_{adm} – Tensão admissível, N/mm².

3.6.1 Chassis

O chassis ficou sobredimensionado, tendo capacidade para resistir a solicitações superiores às solicitações envolvidas no funcionamento do dispositivo. Não se optou por diminuir determinadas partes do chassis porque é importante que o dispositivo tenha mais peso para que a força exercida pela mola de gás não desequilibre o dispositivo.

A geometria do chassis foi desenhada essencialmente para que os elementos a si acoplados fiquem posicionados no local pretendido.

O chassis divide-se em 3 ou 4 partes dependendo do modelo de aro da porta que se esteja a soldar. Podemos então separar o chassis em chassis superior, chassis interior, chassis exterior e espaçador.

Nas figuras seguintes (Figura 3.29, Figura 3.30, Figura 3.31 e Figura 3.32) apresentam-se os pormenores dos 4 elementos do chassis.

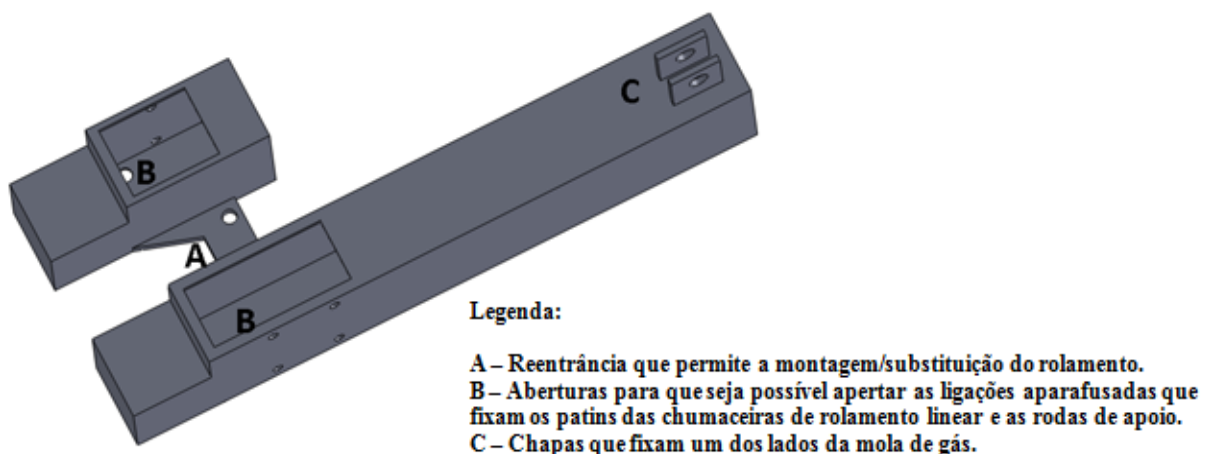


Figura 3.29: Parte exterior do chassis

Legenda:

A – Reentrância (para permitir que o mecanismo tipo “suspensão possa movimentar-se ao longo de todo o curso pretendido).

B – Furos passantes (para ser possível apertar os parafusos que fixam o motor à parte interior do chassis).

C – Furos (onde são fixados os apoios das molas de torção).

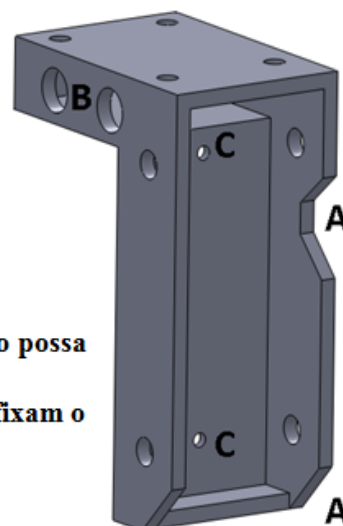
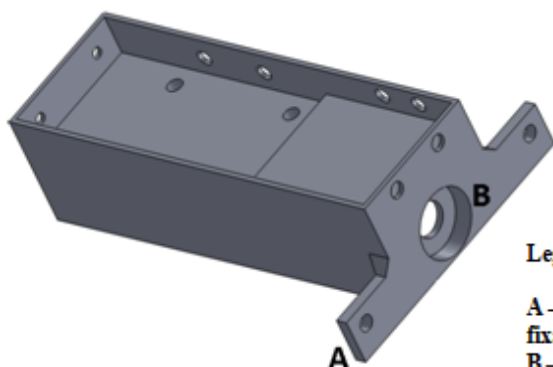


Figura 3.30: Parte interior do chassis



Legenda:

A – Alargamento da parte superior do chassis para ser possível fixar correctamente a parte superior à parte exterior.

B – Caixa para o rolamento com furo passante onde passará o veio.

Figura 3.31: Parte superior do chassis

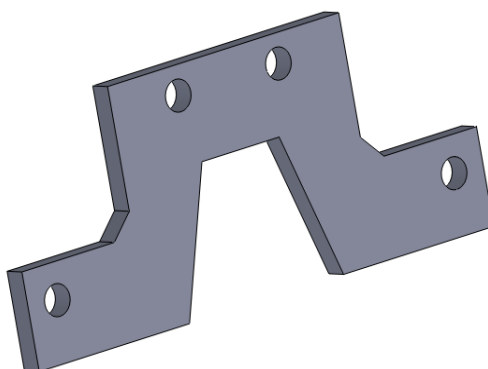


Figura 3.32: Espaçador do chassis

O espaçador tem 5 mm de espessura e é montado no dispositivo apenas quando é necessário soldar aros de porta com 45 mm de espessura.

3.6.2 Chapa de acoplamento da mola de gás à chumaceira linear e suportes da tocha

Nas condições de funcionamento normal, assumiu-se que o peso da tocha é de 50 N e sabe-se que a força máxima da mola de gás é de 30 N.

Consideram-se as reacções na esfera localizada mais longe do ponto de aplicação da força da mola de gás e nos furos passantes onde é feita a ligação aparafusada da chapa às guias das chumaceiras lineares.

Com estes parâmetros, o Simulation do Solidworks indica que a tensão máxima exercida nos elementos é 27,8 N/mm² como é apresentado na Figura 3.33.

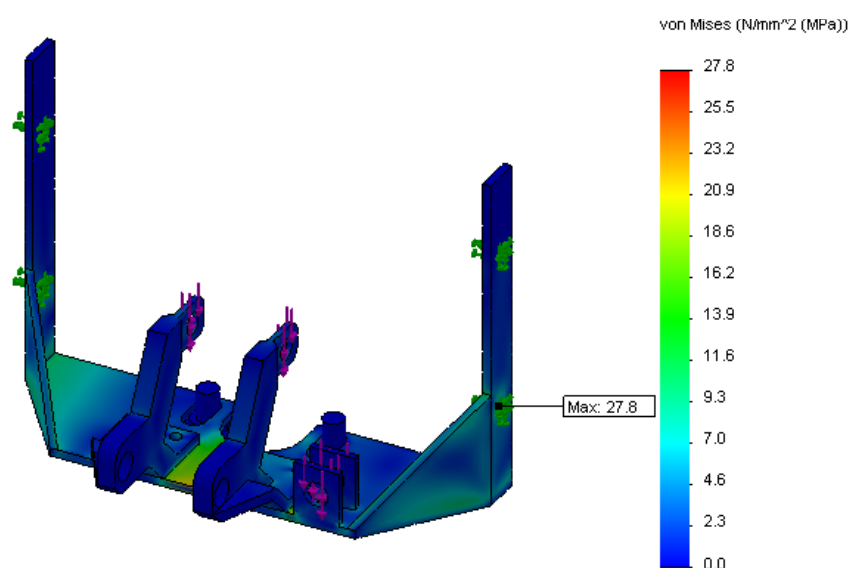


Figura 3.33: Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 1

O deslocamento máximo é 0,07 mm, como apresentado na Figura 3.34. Este valor de deslocamento é insignificante para o funcionamento do dispositivo.

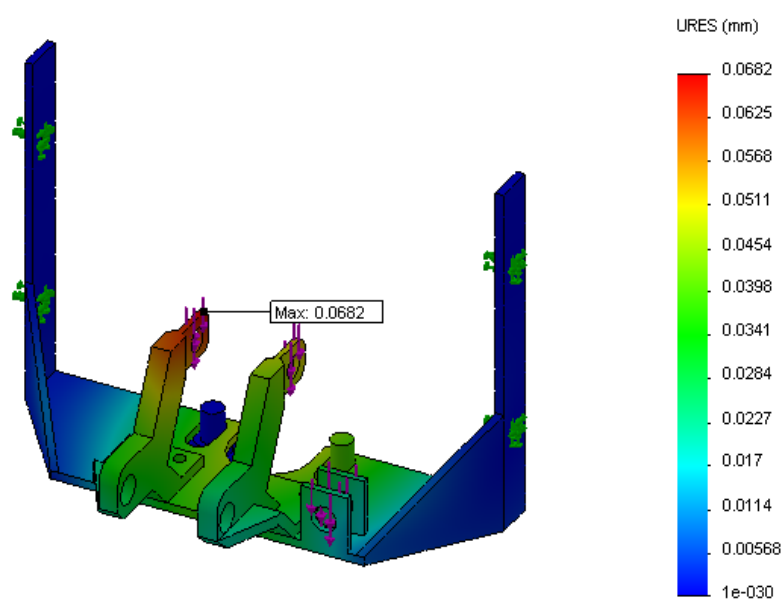


Figura 3.34: Deslocamentos na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha

Como este conjunto de elementos está posicionado do lado exterior do aro da porta e é frequentemente manipulado por operadores, optou-se por fazer um dimensionamento tendo em conta possíveis esforços exercidos pelos operadores. Para tal optou-se por testar este conjunto de elementos aos esforços máximos suportados pelas chumaceiras lineares, seguindo assim um critério de igual resistência.

Do ponto 3.4.5 concluiu-se que as forças que provocam os momentos máximos em cada chumaceira linear são:

$$Fa = 630,491 \text{ N}; \quad Fb = 630,491 \text{ N}$$

Tendo em conta que a chapa está fixada às duas chumaceiras lineares, temos que duplicar a força, pelo que a força máxima exercida nas chumaceiras lineares será:

$$Fa = 1260,98 \text{ N}; \quad Fb = 1260,98 \text{ N}$$

Mantendo as forças normais de funcionamento e aplicando uma força adicional de $1260,98 \text{ N}$ num dos suportes da tocha, restringindo o movimento na face que está em contacto com o rolamento linear e restringindo o movimento nos furos por onde passam os parafusos de fixação da chapa às chumaceiras lineares, obtemos um tensão máxima de $215,1 \text{ N/mm}^2$ como mostra a Figura 3.35.

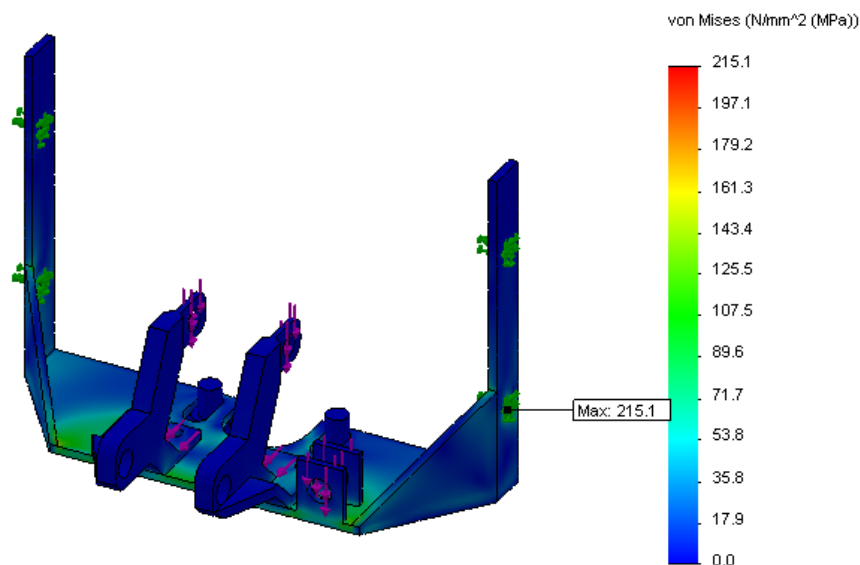


Figura 3.35: Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 2

Mantendo a mesma configuração mas aplicando a força no suporte, mas numa direcção perpendicular e alterando as reacções, restringindo apenas os furos de fixação da chapa às guias das chumaceiras lineares, obtêm-se $166,5 \text{ N/mm}^2$ como mostra a Figura 3.36.

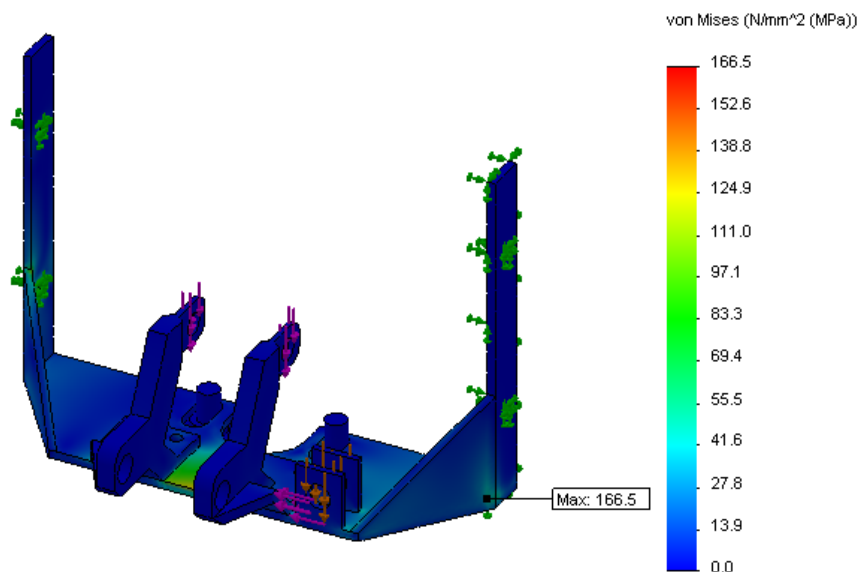


Figura 3.36: Distribuição de tensões na chapa de acoplamento das chumaceiras lineares e suportes de tocha 3

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$, todos os valores de tensão provenientes das simulações realizadas ficaram abaixo dos valores da tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.3 Elementos de suporte das molas helicoidais de compressão

Estes elementos, responsáveis por movimentar a tocha através da acção de sistemas mola/parafuso, apresentam-se numerados na Figura 3.37.

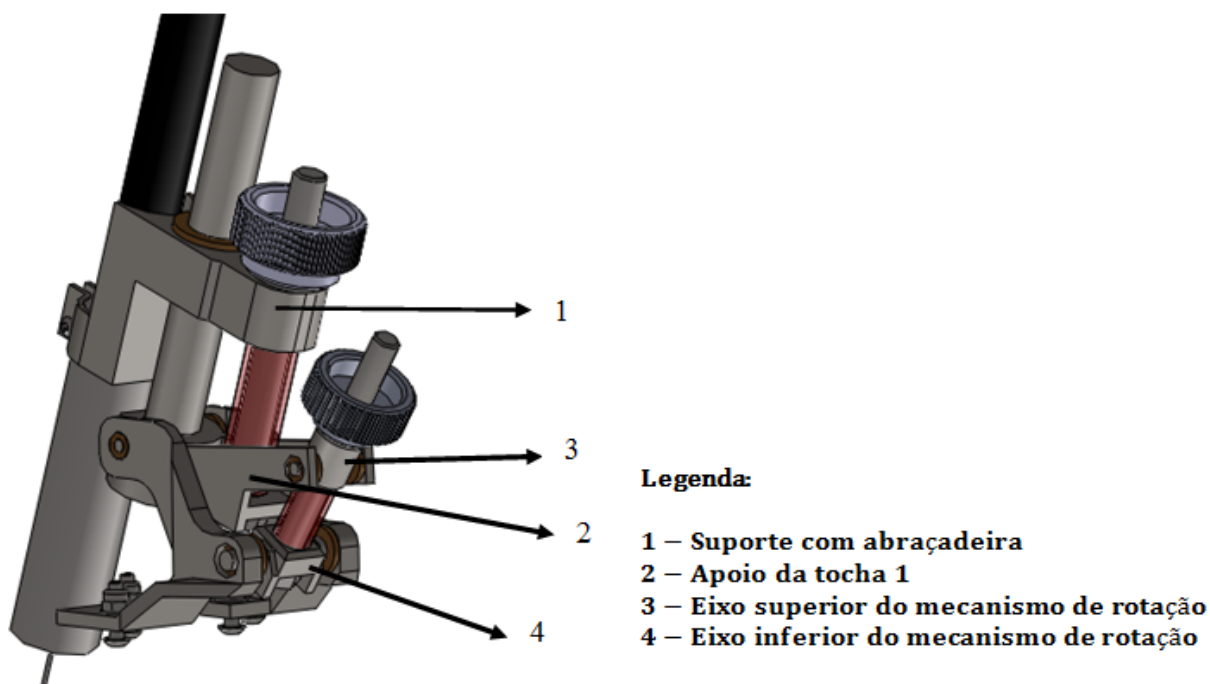


Figura 3.37: Mecanismos de ajuste do posicionamento da tocha

Como as forças transmitidas pelas molas de compressão helicoidais são anuladas, numa lado, pelas reacções das porcas, e noutro lado, pelas reacções das cabeças dos parafusos, as forças envolvidas funcionam apenas como forças de compressão. Consequentemente as forças envolvidas não são consideráveis tendo em conta a geometria dos elementos.

Dos 4 elementos referidos na Figura 3.37 apenas o elemento 1, responsável por segurar a tocha, tem que ser cuidadosamente dimensionado.

O elemento 1, tem que ser dimensionado de modo a que seja possível inserir a tocha e posteriormente fixa-la de modo a que esta não tenha qualquer movimento em relação ao elemento em questão. Este elemento tem que suportar o pequeno esforço realizado pelo operador aquando da montagem. O aperto deve ser feito com cuidado, apertando a ligação aparafusada apenas até a tocha deixar de ter o movimento relativo face ao elemento, para que não haja deformação do elemento e da tocha.

A Figura 3.38 apresenta a deformação do elemento 1 aplicando uma força de 30 N em cada um dos furos, simulando a força exercida pelo parafuso. Esta simulação mostra a capacidade de deformação do elemento, com o objectivo de testar a capacidade da força exercida pelo parafuso apertar a tocha, não sendo anulada pela força do efeito mola proveniente da geometria do elemento.

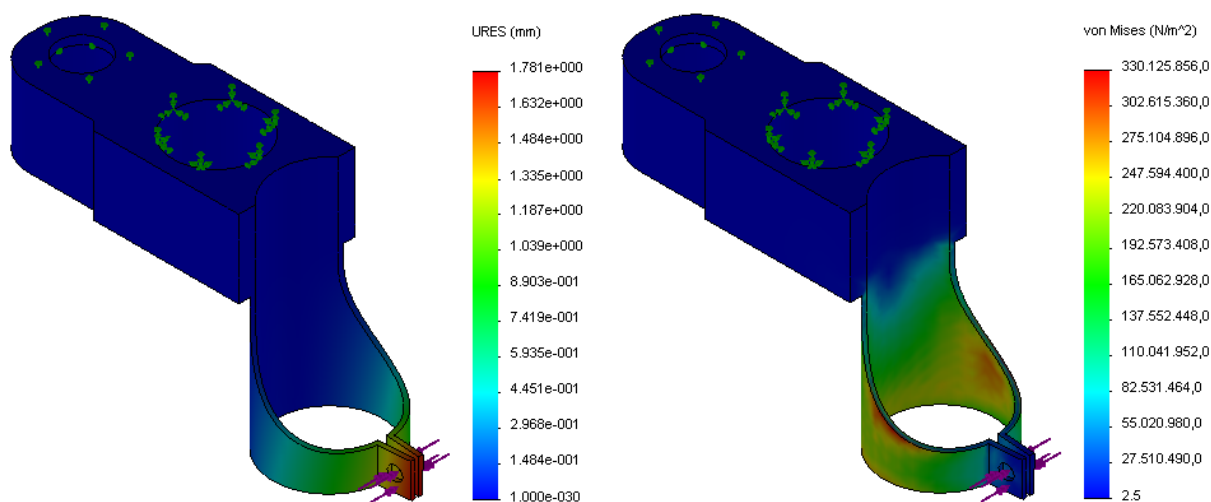


Figura 3.38: Distribuição de tensões e deslocamento no elemento 1 de suporte da tocha

Aplicando uma força de 30 N em cada furo, estes aproximam-se em 3,56 mm, o que garante a flexibilidade do elemento. Aplicando estes parâmetros a tensão máxima lida é de 330 N/mm², no entanto esta tensão será muito inferior uma vez que o deslocamento será restringido pela tocha.

O elemento 1 foi dimensionado para funcionar com tochas com bocal com 25 mm de diâmetro, no caso de serem utilizadas tochas com bocais com medidas inferiores, terão que ser construídos casquilhos para que seja possível montar a tocha neste elemento.

3.6.4 Chapa de apoio da roda de translação

Este componente será responsável por fazer a união entre a roda “Shepherd” e a parte superior do chassis.

Para dimensionar este dispositivo fixaram-se os furos onde será feita a ligação aparafusada entre este elemento e o chassis e aplicou-se uma força de 150 N na outra face, simulando que em determinada situação o peso do dispositivo estaria todo sobre a roda da “Shepherd”.

Com esta configuração, a flecha máxima deste componente é 0,32 mm como mostra a Figura 3.39.

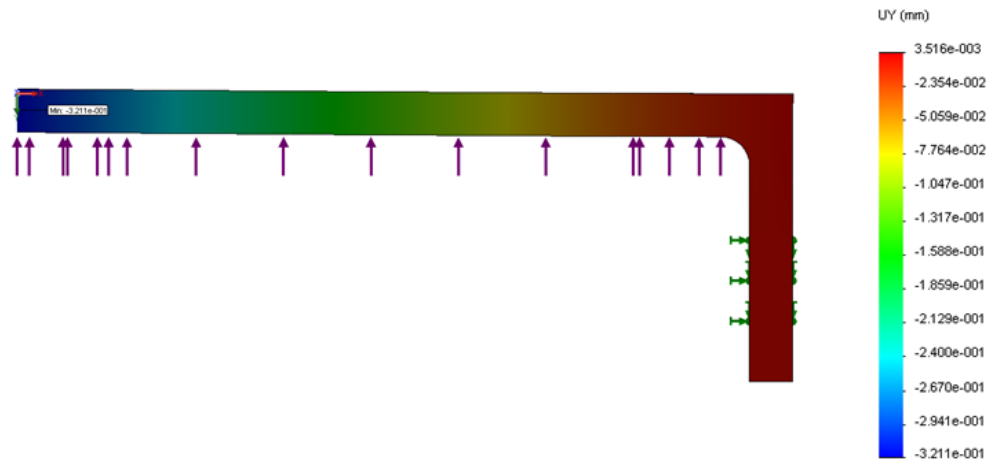


Figura 3.39: Deslocamento da chapa de apoio à roda de translação

A tensão máxima fica-se pelos 162,8 N/mm² como apresentado na Figura 3.40.

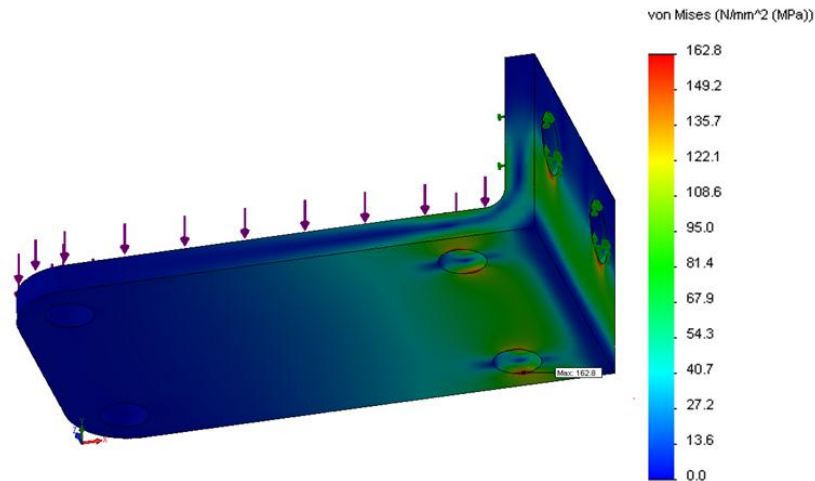


Figura 3.40: Distribuição de tensões na chapa de apoio da roda de translação

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$, todos os valores de tensão provenientes das simulações realizadas ficaram abaixo dos valores da tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), e o valor da flecha não é crítico, pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.5 Veios de união dos triângulos de suspensão

Para o dimensionamento dos veios de união dos triângulos de suspensão considerou-se que a força aplicada na roda seria a força máxima exercida pelas molas de torção na direcção x, pelo que o valor da força exercida nesta direcção foi retirado da Tabela 3.12 do capítulo referente à escolha das molas de torção.

Na Figura 3.41 apresentam-se os resultados da simulação considerando que a força é aplicada num cilindro com zona de contacto com o veio com a mesma dimensão da zona de contacto entre a roda utilizada e o veio, e restringindo o movimento dos furos que unem os veios aos “triângulos de suspensão”.

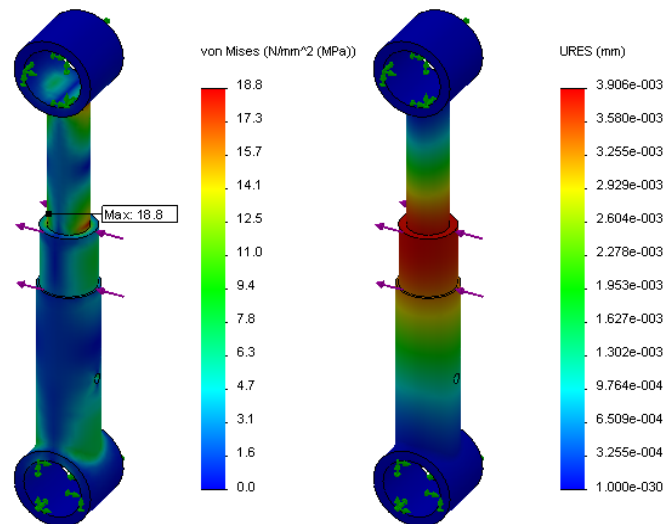


Figura 3.41: Distribuição de tensões e deslocamento nos veios da “suspensão”

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$, todos os valores de tensão provenientes das simulações realizadas ficaram abaixo dos valores da tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), e o valor da flecha não é crítico, pelo que o dimensionamento é aceite.

Estes dois elementos serão unidos através de uma ligação por cavilha, como apresentado no ponto 3.4.11.

Para que o dispositivo de soldadura possa ser colocado no aro da porta a soldar, é necessário afastar a roda do aro, comprimindo a “suspensão”, para tal, o eixo inferior do mecanismo de suspensão terá uma parte acessível aos operadores para ser possível puxar a roda.

Restringindo os furos e aplicando as forças nas molas, majoramos as forças aplicadas, uma vez que devido à distância a que as forças são aplicadas, não será necessária tanta intensidade para afastar a roda.

Na Figura 3.42 apresenta-se a distribuição de tensões devido aos esforços aplicados para afastar a roda do aro da porta.

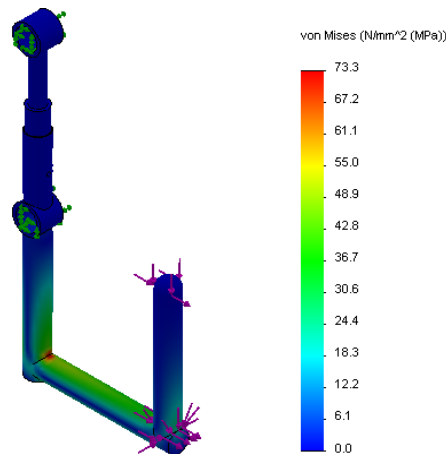


Figura 3.42: Distribuição de tensões proveniente do esforço para afastar a roda do aro da porta

A tensão máxima obtida foi de 73,3 N/mm².

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n1 = 1,5$, $n2 = 1$, todos os valores de tensão provenientes das simulações realizadas ficaram abaixo dos valores da tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), e o valor da flecha não é crítico, pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.6 Triângulos de suspensão

Tendo em conta a geometria destes elementos e os esforços envolvidos, torna-se evidente que as reentrâncias onde serão inseridos os braços das molas são os únicos pontos críticos dos elementos.

Como é difícil obter a força exercida pelas molas de torção nos “triângulos”, optou-se por verificar qual é a força máxima que estes elementos suportam. Para que a tensão máxima fosse próxima da tensão máxima admissível, foi necessário aplicar 2950 N em cada um dos braços, esta força é garantidamente superior à força que a mola de torção consegue exercer nestes elementos.

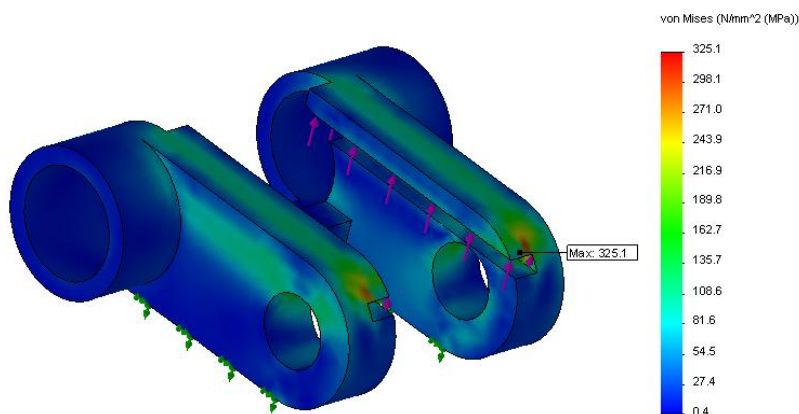


Figura 3.43: Distribuição de tensões nos “triângulos de suspensão”

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n1 = 1,5$, $n2 = 1$, os valores de tensão da simulação realizada são inferiores ao valor de tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.7 Protector de rodas dentadas

As rodas dentadas terão um elemento protector, que servirá para proteger os operadores e para proteger as rodas dentadas da sujidade.

Este elemento será fixado à parte superior do chassis do dispositivo utilizando dois parafusos. Estes parafusos serão sextavados para facilitar a montagem, porque seria difícil segurar a cabeça dos parafusos se esta fosse sextavada interior devido à geometria das chaves.

Esta peça não é solicitada ao longo do funcionamento do dispositivo, pelo que não é necessário realizar simulações.

3.6.8 Veio de transmissão

Será adquirido um varão redondo com diâmetro de 14 mm com as tolerâncias da norma EN 10060 com o objectivo de o maquinar de modo a gerar um veio com vários diâmetros diferentes ao longo do eixo axial [32].

$$\sigma_c \leq 490 \text{ N/mm}^2$$

O veio terá um furo passante radial com 4 mm de diâmetro onde será inserida a cavilha apresentada no ponto 3.4.11.

Para verificar a distribuição de tensões ao longo do veio optou-se por se analisar a situação extrema de aplicar o momento máximo proveniente da engrenagem e restringir o movimento na ponta oposta. A distribuição de tensões ao longo do veio de transmissão é apresentada na Figura 3.44.

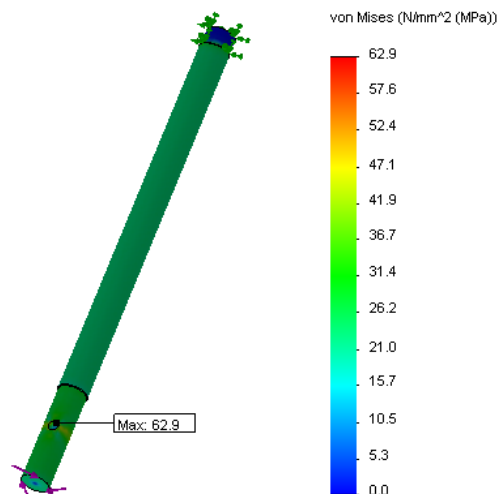


Figura 3.44: Distribuição de tensões ao longo do veio de transmissão

A tensão máxima obtida da simulação realizada no solidworks é de 62,9 N/mm².

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$, os valores de tensão da simulação realizada são inferiores ao valor de tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.9 Junta

Devido à diferença de diâmetros entre o veio de saída do moto-reductor (11 mm) e o furo da engrenagem (12 mm) utiliza-se uma junta para permitir a união dos elementos.

A junta será montada no veio de 11 mm através de uma ligação enchavetada e será montada à engrenagem através de uma ligação por cavilha.

Para fazer a análise de tensões desta peça, optou-se por aplicar o momento de torção na ponta da junta de modo a majorar o valor da tensão máxima. E restringiu-se o movimento no furo onde será inserido o veio de saída do moto-reductor.

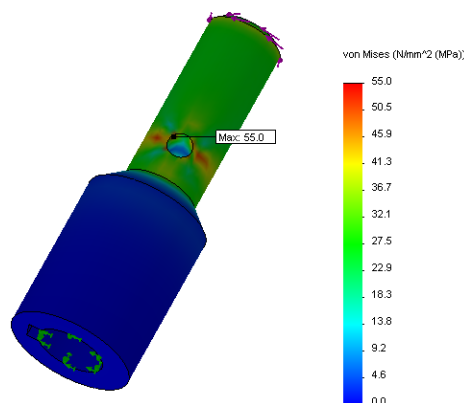


Figura 3.45: Distribuição de tensões na junta

A tensão máxima obtida da simulação realizada no solidworks é de 55 N/mm^2 .

Aplicando as equações Eq. 3.36 e Eq. 3.37 com $\sigma_c = 490 \text{ N/mm}^2$, $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$, os valores de tensão da simulação realizada são inferiores ao valor de tensão admissível ($\sigma_{adm} \leq 327 \text{ N/mm}^2$), pelo que o dimensionamento é aceite.

3.6.10 Apoios das molas de torção

Os apoios da mola de torção restringem o movimento da parte central da mola. Estes elementos têm uma geometria simples, e as forças aplicadas pelas molas de torção provocarão tensões irrelevantes.

3.6.11 Espaçador do moto-reductor

Para que o moto-reductor fique à distância pretendida do chassis, de modo a proporcionar um bom engrenamento, é necessário afastar o motor 0,7 mm do chassis, pelo que se optou por utilizar 4 anilhas com 0,7 mm de espessura, uma por parafuso, para afastar o moto-reductor.

3.7 Análise do comportamento do dispositivo

A variação da distância da tocha em relação à junta de soldadura é um dos parâmetros cruciais para que o processo de soldadura seja bem sucedido. Fez-se o estudo das variações da distância vertical e horizontal da tocha ao cordão de soldadura ao longo do processo.

A distância horizontal entre a tocha e o cordão de soldadura varia devido ao posicionamento da tocha em relação às rodas que seguem a superfície do aro da porta. Este posicionamento faz com que a tocha esteja mais próxima da junta de soldadura nas zonas curvilíneas elípticas dos aros das portas do que nas zonas correspondentes aos segmentos de recta, obtendo-se uma variação de cota no valor de 2,29 mm no aro de 40 mm de espessura e 2,28 mm no aro de 45 mm de espessura.

A variação da cota vertical revelou-se o maior problema no projecto do dispositivo de soldadura. A distância vertical da tocha varia ao longo do aro da porta devido à curvatura e conicidade da torre metálica, pelo que a torre com menor diâmetro, a torre A, será aquela que trará maiores problemas ao processo de soldadura realizado pelo dispositivo.

Das duas esferas, apenas uma esfera está em contacto com a torre metálica ao longo do percurso realizado pelo dispositivo. Apenas nos topos do aro da porta, por pequenos instantes, estão as duas em contacto com a torre. A montagem destas esferas tem uma afinação da distância horizontal ao aro da porta para que seja possível realizar o processo de soldadura no caso dos processos de corte e chanfragem da torre metálica não serem realizados convenientemente e seja necessário afastar as esferas para que não entrem na zona referente ao chanfro, evitando assim diferenças de distância vertical abruptas ao longo do processo de soldadura. Esta afinação permite uma variação de distância horizontal de 9,5 mm.

No modelo A da torre metálica, com as esferas colocadas o mais próximo possível do aro da porta, a variação da distância vertical atinge os 4,47 mm. Se as esferas estiverem colocadas no extremo oposto, a distância vertical atinge uma variação de 9,11 mm.

O modelo de torre com menor diâmetro da secção da torre, depois do modelo A é o modelo D, correspondente à torre com 38 mm de espessura. Neste modelo a variação da distância vertical da tocha em relação à junta de soldadura apresenta valores muito mais pequenos do que no modelo estudado anteriormente, ficando pelos 3,67 mm de variação na situação em que a esfera está situada no ponto mais afastado do aro e pelos 1,65 mm de variação na situação em que a esfera está situada no ponto mais próxima do aro.

Nos restantes modelos de torre, os valores da variação da distância vertical da tocha serão ainda mais reduzidos, uma vez que os diâmetros das secções das outras torres são ainda maiores.

Daqui conclui-se que não haverá problemas ao longo dos processos de soldadura realizados nos modelos B, C, D, e E. Quanto ao modelo A, é importante que os processos de corte e chanfragem da torre metálica sejam feitos com maior precisão, de modo a que não seja necessário afastar a esfera para realizar o processo de soldadura.

A variação da distância vertical da tocha ao cordão de soldadura será compensada pelo sistema de auto-regulação do processo de soldadura. A variação da distância horizontal não trará qualquer problema ao processo de soldadura.

Caso a empresa decida que este dispositivo é a melhor solução para o trabalho pretendido, devem ser estudados os métodos adequados à construção das peças dimensionadas. Para de seguida se proceder à sua construção.

Durante a fase experimental do dispositivo de soldadura, alguns dos elementos projectados devem ser observados atentamente. É importante conferir se as molas de compressão helicoidais escolhidas para imobilizar a tocha ao longo de cada passagem do processo de soldadura, conseguem cumprir o objectivo, e se as molas de torção conseguem manter o dispositivo encostado ao aro da porta ao longo de todo o processo. A razão para estes elementos merecerem especial atenção deve-se ao facto de aquando do dimensionamento terem sido assumidos os valores de atrito de rolamento da roda de tracção e os valores referentes ao peso da tocha (e cabos de alimentação), pelo que faz sentidos testar estes elementos com maior cuidado.

Estima-se que a duração do processo de soldadura diminua para cerca de 193 minutos, assumindo a utilização do processo de soldadura por fios fluxados (FCAW) com eléctrodos com 1,2 mm de diâmetro, velocidade de soldadura de 450 mm/min, realizando cerca de 12 passagens para preencher todo o cordão de soldadura e mantendo os restantes parâmetros do processo de soldadura idênticos aos utilizados no processo de soldadura manual.

Na duração estimada não estão incluídas algumas acções indispensáveis ao processo, como o pré-aquecimento do cordão de soldadura, a execução do cordão de passe que terá que ser sempre realizado manualmente por um operador, a remoção de escória entre passagens, o tempo despendido no ajuste da tocha depois de cada passagem e o acabamento final do cordão para melhorar o aspecto e anular as zonas de concentração de tensões. Contabilizando todo o tempo necessário para realizar estas acções, pode estimar-se que a duração total do processo seria inferior a 15 horas.

A automatização do processo de soldadura permite também optar pela utilização de eléctrodos com 2,4 mm de diâmetro, uma solução possível apenas em dispositivos automatizados devido ao calor libertado. No caso de se optar por esta solução, a duração do processo de soldadura diminuiria consideravelmente.

Para além disso poderá ser importante analisar se será mais vantajoso utilizar o processo de soldadura por fios fluxados (FCAW) e depois remover a escória gerada por este processo ou se será mais eficaz utilizar o processo de soldadura MIG/MAG (GMAW), uma vez que este, apesar de ter uma taxa de deposição inferior ao primeiro, realiza o processo sem gerar escória.

O dispositivo projectado ocupa apenas um operador durante o processo de soldadura. Este operador limitar-se-á a fazer o pré-aquecimento da junta de soldadura, ajustar a tocha antes de iniciar cada passagem, remover a escória entre passagens, fazer a introdução e verificação dos parâmetros de soldadura e a realizar o acabamento do cordão.

4. Alternativas ao dispositivo de soldadura

4.1 Requisitos das consultas

Foram feitas consultas a algumas empresas do ramo de automatização de soldadura com os seguintes requisitos:

1 - Possibilidade de realização de 3 processos, sendo eles:

- Reconhecimento das coordenadas da geometria do aro da porta;
- Processo de corte e chanfragem da torre metálica, com as coordenadas da geometria do aro da porta;
- Processo de soldadura do aro da porta à torre metálica.

2 - Capacidade de corte (perfuração) até 52 mm de espessura.

3 - Desimpedimento da área para ser possível movimentar a torre metálica.

4 - As várias passagens do processo de soldadura devem formar um cordão final, composto por vários cordões dispostos em pirâmide, preenchendo toda a junta a soldar.

4.2 Hipóteses sugeridas

Aquando da consulta às empresas, foram sugeridas as seguintes ideias:

1. - Utilização do robot virado para baixo suspenso num pórtico, como mostra a Figura 4.1.
 - Deslocamento do pórtico através de carris para desimpedir o espaço percorrido pela torre metálica.



Figura 4.1: Robot montado num pórtico [33]

2. – Unidade de movimento linear (Figura 4.2) suspensa em cima duma coluna, de modo a chegar à zona de soldadura pelo interior da torre metálica.



Figura 4.2: Robot aplicado numa unidade de movimento linear [33]

Nenhuma das hipóteses sugeridas permitia a realização do processo de soldadura pelos dois lados da torre metálica, interior e exterior. A 2ª hipótese não permitia que a torre fosse removida do local na direcção radial, tendo primeiro que fazer um movimento na direcção axial e só posteriormente podia ser deslocada em qualquer direcção.

4.3 Descrição do processo de consulta às empresas

Foram efectuadas consultas a três empresas, mas até à data foram recebidas apenas duas propostas de células robotizadas da empresa ASB, *Solutions*. Foi também recebida uma proposta espontânea da empresa Electro Portugal.

Com o objectivo de se obter propostas, com vista à escolha da melhor solução para automatizar o processo de montagem dos aros das portas das torres eólicas, contactou-se a empresa KUKA Robots IBÉRICA, S.A. no dia 15 de Fevereiro de 2011. Esta empresa apenas vende robots, subcontratando projectos a outra empresa, a ASB, *solutions*, com a qual se discutiu os requisitos pretendidos para desempenhar o trabalho pretendido. A ASB ficou de enviar uma proposta com uma solução que realizasse o trabalho pretendido, seguindo os requisitos enumerados em 4.1.

A primeira proposta da ASB chegou no dia 22 de Março de 2011.

No dia 27 de Abril após uma reunião com a ASB *Solutions* em Sever do Vouga, na A. Silva Matos, a ASB *Solutions* ficou de apresentar uma outra proposta.

No dia 22 de Junho houve uma nova reunião na A. Silva Matos onde foi apresentada a segunda proposta, com uma solução completamente diferente, explicada adiante.

A empresa PAKA-Robot & Welding Systems Lda., foi contactada no dia 2 de Junho de 2011, com o objectivo de obter uma nova proposta para uma célula robotizada, tendo ficado de enviar uma proposta tão breve quanto possível, no entanto não chegou qualquer proposta até à data.

Por fim, a Electro Portugal apresentou uma proposta espontânea à A. Silva Matos, baseada num sistema de mecanização do processo de montagem dos aros das portas, da marca Promotech.

4.4 Descrição das propostas recebidas

Neste subcapítulo serão descritas as propostas recebidas.

- Proposta nº1 ASB, Solutions

A solução dada pela ASB foi diferente das hipóteses sugeridas, optando a ASB por montar o “Robot no topo de uma estrutura metálica, à altura da Torre Eólica quando na horizontal (aprox.4m), sob uma mesa rotativa de 0°-90° para aproximação do Robot à área de soldadura (posição 90°) e desimpedimento da área para carga e descarga da torre por ponte rolante (posição home a 0°) ”. [34]

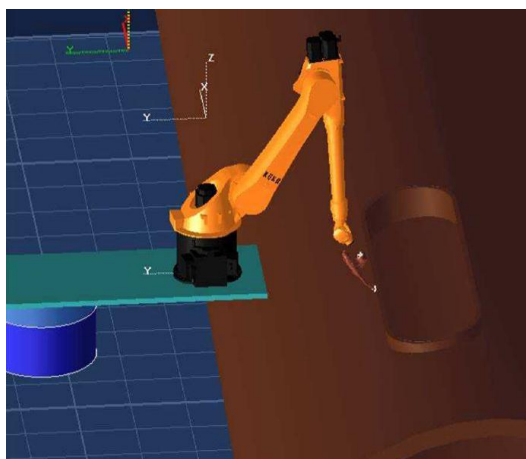


Figura 4.3: Solução nº1 apresentada pela ASB, Solutions [34]

Esta proposta previa uma possível alteração do posicionamento do chanfro de modo a que o cordão exterior fosse maior que o cordão interior, uma vez que o processo de soldadura pelo lado interior continuaria a ser realizado manualmente. O que acaba por ser a principal desvantagem desta solução.

Após visita às instalações da A. Silva Matos, os técnicos da ASB concluíram não ser possível aplicar esta solução, por falta de espaço, devido ao local onde são realizados os processos necessários à montagem dos aros das portas não permitir a instalação da coluna no sítio pretendido.

- Posposta nº2 ASB, Solutions

A segunda proposta, apresentada pela ASB, consistia num sistema de movimentação do robot em dois eixos, vertical para possibilitar o posicionamento tanto na parte inferior como na parte superior da torre, e horizontal para que fosse possível realizar o movimento vertical sem embater na torre e para poder remover o robot para uma posição de descanso para não haver impedimento à deslocação da torre metálica nas instalações, da etapa anterior para a etapa da montagem do aro da porta, e desta etapa para a etapa seguinte.

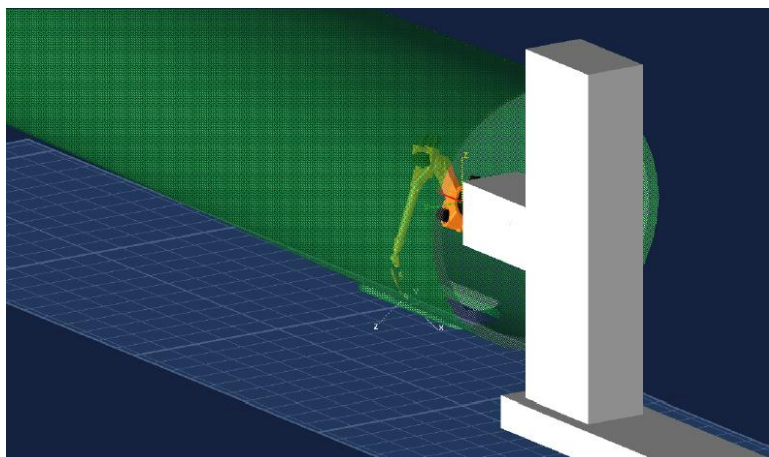


Figura 4.4: Solução nº2 apresentada pela ASB, Solutions [34]

Esta proposta tinha como pontos fracos, o elevado custo e a excessiva ocupação permanente de espaço.

Tanto esta proposta como a proposta anterior têm como principal ponto forte a possível adaptação dos equipamentos utilizados em futuros projectos.

- Proposta Electro Portugal

A empresa Electro Portugal apresentou uma proposta espontânea à A. Silva Matos, em que foi apresentado o equipamento MCM 4000 da Promotech.

A Promotech desenvolveu um sistema de automatização dos processos necessários à montagem dos aros das portas nas torres metálicas (Figura 4.5).

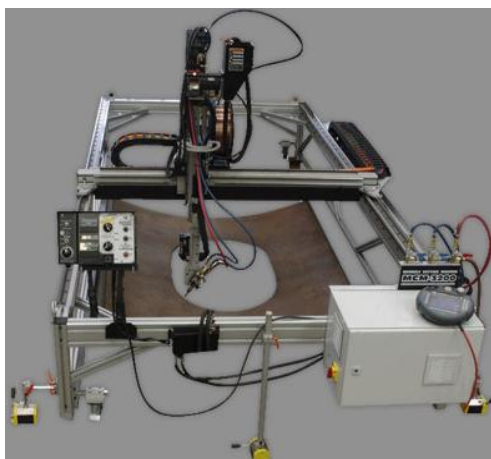


Figura 4.5: Promotech MCM 4000 [35]

Realiza inicialmente o reconhecimento da geometria do aro da porta, de seguida efectua o processo de corte e chanfragem da torre metálica, seguindo a geometria obtida anteriormente, e por fim executa o processo de soldadura por arco submerso.

Este sistema tem a desvantagem de ocupar muito espaço e de ser necessário transportar um conjunto de acessórios com o peso total de 760 kg para o interior da torre metálica nos processos realizados no interior, e para o topo da torre metálica para os processos realizado no exterior como mostra a Figura 4.6.



Figura 4.6: Promotech MCM 4000 colocado na torre metálica [35]

Tem também a desvantagem de não ser adaptável a outros trabalhos.

Uma das principais vantagens é a utilização do processo de soldadura por arco submerso, que consegue diminuir a duração de todo o processo de montagem do aro da porta. E tem também a vantagem de não ser um processo novo de raiz, tendo sido já utilizado nalgumas outras empresas do mesmo ramo de actividade.

5. Escolha da solução

Neste subcapítulo será feita a escolha da melhor solução com vista à automatização do processo de montagem dos aros das portas nas torres metálicas.

5.1 Matriz de decisão

Para se escolher a melhor solução, utilizou-se a metodologia Matriz de Decisão.

Das alternativas ao dispositivo projectado apresentadas no capítulo 4, apenas serão comparadas ao dispositivo a segunda proposta da ASB, Solutions e a proposta da Electro Portugal. Tendo sido excluída a primeira proposta apresentada pela ASB, como foi explicado anteriormente.

Na Tabela 5.1 apresentam-se as especificações das soluções apresentadas juntamente com as especificações do processo actual.

Não pode ser disponibilizada toda a informação sobre as propostas recebidas, devido a questões relacionadas com a confidencialidade de dados, pelo que a tabela nem sempre terá valores quantitativos, tendo-se optado por uma avaliação qualitativa.

Tabela 5.1: Especificações das alternativas ao dispositivo projectado

Elementos	ASB 2	Electro Portugal	Dispositivo Projectado	Situação actual
Custo de aquisição qualitativo	Alto	Médio	Baixo	0
Processos de corte utilizado	Plasma Robotizado	Plasma Mecanizado	Oxicorte Manual	Oxicorte Manual
Processo de soldadura utilizado	Fios Fluxados Robotizado	Arco Submerso Mecanizado	Fios Fluxados Mecanizado	Fios Fluxados Manual
Qualidade do reconhecimento de coordenadas	Boa	Boa	Má (baseado na geometria do molde)	Má (baseado na geometria do molde)
Funções dos equipamentos				
Reconhecimento de coordenadas automático	Sim	Sim	Não	Não
Corte e chanfragem automatizada	Sim	Sim	Não	Não
Colocação do aro automatizado	Não	Não	Não	Não
Aquecimento do cordão automatizado	Não	Não	Não	Não
Soldadura do cordão de passe automatizada	Não	Não	Não	Não
Soldadura interior automatizada	Sim	Sim	Sim	Não
Soldadura exterior automatizada	Sim	Sim	Sim	Não
Remoção de escória automatizada	Não	Não	Não	Não

Não se inclui nesta análise indicações referentes a garantia, assistência, fiabilidade, prazos e métodos de pagamento, porque estes elementos não foram disponibilizados em todas as propostas.

Da análise da Tabela 5.1 conclui-se que os equipamentos ASB 2 e Electro Portugal são os equipamentos mais autónomos, ocupando menor mão-de-obra e o dispositivo projectado é a solução mais económica.

5.1.1 Árvore modelo

A Tabela 5.2 contém a árvore modelo

Tabela 5.2: Árvore modelo

Solução para automatizar o processo de montagens do aros das portas				
Custo	Qualidade do serviço	Duração	Espaço de trabalho ocupado	Utilidade extra processo
Custo de aquisição Custo de Mão-de-obra Consumo	Reconhecimento de coordenadas Corte e chanfragem Soldadura	Reconhec. de coordenadas Corte e chanfragem Soldadura	Espaço ocupado em utilização Espaço ocupado em Stand-by	Utilidade extra processo

5.1.2 Árvore de objectivos

A árvore de objectivos é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Árvore de objectivos

O1=1				
O21=0,3	O22=0,25	O23=0,25	O24=0,15	O25=0,05
O311=0,6 O312=0,25 O313=0,15	O321=0,25 O322=0,25 O323=0,5	O331=0,2 O332=0,2 O333=0,6	O341=0,4 O342=0,6	O351=1

5.1.3 Cálculo dos factores de ponderação

Os pesos dos critérios individuais em cada nível da árvore devem somar 1,0. Para obter o peso de um factor de ponderação de um nível inferior, multiplicam-se os pesos percorrendo os correspondentes ramos da árvore de baixo para cima.

$$\text{Custo de aquisição} = O311 = 0,6 \times 0,3 \times 1 = 0,18$$

$$\text{Custo de mão-de-obra} = O312 = 0,25 \times 0,3 \times 1 = 0,075$$

$$\text{Consumo energético} = O313 = 0,15 \times 0,3 \times 1 = 0,045$$

Qualidade de rec. de coordenadas = $O321 = 0,25 \times 0,25 \times 1 = 0,0625$

Qualidade de corte e chanfragem = $O322 = 0,25 \times 0,25 \times 1 = 0,0625$

Qualidade de soldadura = $O323 = 0,5 \times 0,25 \times 1 = 0,125$

Duração do Rec. de coordenadas = $O331 = 0,2 \times 0,25 \times 1 = 0,05$

Duração do corte e chanfragem = $O332 = 0,2 \times 0,25 \times 1 = 0,05$

Duração da soldadura = $O333 = 0,6 \times 0,25 \times 1 = 0,15$

Espaço ocupado em utilização = $O341 = 0,4 \times 0,15 \times 1 = 0,06$

Espaço ocupado em standby = $O342 = 0,6 \times 0,15 \times 1 = 0,09$

Utilização extra processo = $O351 = 1 \times 0,05 \times 1 = 0,05$

5.1.4 Matriz de decisão

A Tabela 5.4 apresenta a matriz de decisão.

Tabela 5.4: Matriz de decisão

Critério	Factor de ponderação	ASB 2		Electro Portugal		Disp. Projectado	
		Classif. simples	Classif. ponderada	Classif. simples	Classif. ponderada	Classif. simples	Classif. ponderada
Custo de aquisição	0,18	0	0	4	0,72	10	1,8
Custo de Mão-de-obra	0,075	9	0,675	8	0,6	5	0,375
Consumo	0,045	6	0,27	6	0,27	6	0,27
Qualidade de Rec. de coordenadas	0,0625	8	0,5	8	0,5	2	0,125
Qualidade do corte e chanfragem	0,0625	10	0,625	10	0,625	7	0,4375
Qualidade da Soldadura	0,125	9	1,125	10	1,25	7	0,875
Duração do Rec. De coordenadas	0,05	9	0,45	9	0,45	2	0,1
Duração do corte e chanfragem	0,05	10	0,5	10	0,5	3	0,15
Duração da soldadura	0,15	7	1,05	10	1,5	6	0,9
Espaço ocupado em utilização	0,06	0	0	2	0,12	10	0,6
Espaço ocupado em stand-by	0,09	0	0	5	0,45	10	0,9
Utilização extra processo	0,05	8	0,4	0	0	0	0
Soma			5,595		6,985		6,5325

5.1.5 Análise da matriz de decisão

Da análise da matriz de decisão conclui-se que a solução que melhor satisfaz os requisitos pretendidos é a proposta apresentada pela Electro Portugal.

Os pontos fortes da proposta da Electro Portugal são a qualidade dos processos e respectiva duração, e o custo de aquisição quando comparado com o custo da solução robotizada apresentada pela ASB. Tem como pontos fracos a impossibilidade da sua utilização num processo de soldadura diferente, o que faz com que na eventualidade de deixar de ser necessário realizar o processo de montagem dos aros das portas, este equipamento se tornasse dispensável.

O dispositivo projectado parece ser a alternativa mais económica que a solução apresentada pela Electro Portugal.

6. Conclusões

Os objectivos desta dissertação foram concretizados. Foi projectado um dispositivo com vista à automatização do processo de soldadura dos aros das portas das torres eólicas. Foram também analisadas alternativas ao dispositivo projectado por parte de sistemas automatizados industriais comercializados por algumas empresas.

O estudo dos métodos de corte indica que o processo de corte por plasma tem vantagens significativas face ao processo oxicorte, tanto para o processo de corte manual como para o processo de corte automatizado, porque o processo de corte por plasma proporciona melhor acabamento da junta e garante maior produtividade.

Do estudo dos métodos de soldadura concluí-se que o processo por arco submerso seria o mais adequado para realizar a soldadura entre o aro da porta e a torre metálica, porque tem uma taxa de depósito muito superior aos restantes processos, no entanto é difícil automatizar este processo em trajectórias não rectilíneas devido à necessidade de ter uma conduta de projecção de granulado antes da tocha e uma conduta de aspiração de granulado depois da tocha.

Sendo assim, a melhor escolha passa a ser o processo de soldadura por fios fluxados com protecção gasosa, este processo actualmente funciona com eléctrodos de 1,2 mm porque não é aconselhável utilizar eléctrodos maiores para não piorar as condições de trabalho dos operadores devido ao aumento de temperatura, mas aplicando este processo de soldadura em dispositivos de soldadura automatizada ou mecanizada, deixa de existir esse problema, pelo que se consegue uma taxa de deposição muito superior à taxa de deposição actual. Este processo tem a desvantagem de ser necessário remover a escória entre passagens. No entanto o tempo de remoção de escória é insignificante quando comparado com o tempo que o processo MAG levaria a mais durante o processo de soldadura.

O dispositivo apresentado nesta dissertação foi a solução encontrada para diminuir os custos e a duração do processo de soldadura dos aros das portas às torres eólicas como foi solicitado pela A. Silva Matos, Energia, S.A.

Este dispositivo conseguirá reduzir significativamente a duração do processo de soldadura dos aros das portas às torres metálicas, em parte, graças à diminuição do número de pausas ao longo do processo. Estima-se que a duração do processo de soldadura pode passar de cerca de 55 horas para 15 horas.

Os custos do processo diminuiriam, essencialmente, devido à menor necessidade de mão-de-obra ao longo do processo, uma vez que o processo passaria a ser acompanhado apenas por um operador.

Durante o desenvolvimento desta dissertação foram abordadas algumas empresas, das quais surgiram soluções para o problema enunciado. Das alternativas apresentadas, depois de aplicar a matriz de

decisão, conclui-se que a melhor alternativa será a solução apresentada pela Electro Portugal, que tem como pontos fortes a qualidade e a duração dos processos.

Bibliografia

- [1] REN. (2011, Junho) centrodeinformacao.ren. [Online].
<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/EnergiaEolica/A%20Energia%20E%C3%B3lica%20em%20Portugal%20-%202010.pdf>
- [2] *Powering Europe: wind energy and the electricity grid.*: ewea, 2010.
- [3] A.Silva Matos. (2011, Junho) www.asilvamatos.pt. [Online].
<http://www.asilvamatos.pt/#/pt/grupo/asm-energia/area-de-negocio/>
- [4] eneop. (2011, Junho) eneop. [Online].
http://www.eneop.pt/subcanais_n1.asp?id_subcanal_n1=184&id_canal=105
- [5] mspesp. (2011, Junho) mspesp. [Online]. http://www.mspesp.com/enco_offshore.html
- [6] Rui M. G. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à energia eólica*, 2009.
- [7] ESAB, Soldadura e Corte Portugal. [Online]. <http://www.esab.com/pt/pt/education/processos.cfm>
- [8] Italo Fernandes, *Curso de Formação de Formadores Teórico-Práticos na Área da Soldadura - ISQ - Volume II*.
- [9] José F. O. Santos and Luísa Quintino, *Processos de Soldadura*, 2nd ed. Oeiras: ISQ edições, 1998.
- [10] Linde Sogás, Lda., Corte Térmico.
- [11] hypertherm. (2011, Junho) hypertherm. [Online].
http://www.hypertherm.com/pt/Training_and_Education/What_is_Plasma/what_is_plasma.jsp
- [12] Italo Fernandes, *Curso de Formação de Formadores Teórico-Práticos na Área da Soldadura - ISQ - Volume I*.
- [13] Rosa Miranda, *Apontamentos aulas Tecnologia Mecânica I*, 2008.
- [14] hypertherm. (2011, Junho) hypertherm. [Online].
http://www.hypertherm.com/pt/pdfs/POR_HPROperatingCost.pdf
- [15] Lincoln Electric, *GMAW Welding Guide*, 2006.
- [16] Italo Fernandes, *Curso de Formação de Formadores Teórico-Práticos na Área da Soldadura - ISQ - Volume III*.
- [17] ESAB, *Arco Submerso*.
- [18] A. Silva Matos, Energia, S.A. , *Desenhos disponibilizados*.
- [19] William F. Milliken and Douglas L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics.*: Society Of Automotive Engineers, Inc., 1995.
- [20] fairlaneproducts. (2011, Junho) fairlaneproducts. [Online].
http://www.fairlaneproducts.com/catalog/Fairlane_Rollers.pdf
- [21] shepherdcasters. (2011, Junho) shepherdcasters. [Online].
<http://www.shepherdcasters.com/pdfs/regent.pdf>
- [22] bodine-electric. (2011, Junho) bodine-electric. [Online]. <http://www.bodine->

- electric.com/Asp/ProductModel.asp?Context=47&Name=Metric%2024A-3F%20Series%20DC%20Right%20Angle%20Gearmotor&Model=N1098&Sort=11845
- [23] hpceurope. (2011, Junho) hpceurope. [Online].
http://www.hpceurope.com/cat11HPC/HPC_T4_2011_GearsAndSprockets_GB.pdf
- [24] skf. (2011, Junho) skf. [Online].
<http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=pt&imperial=false&windowName=null&perfid=105024&prodid=1050240001>
- [25] thk. (2011, Junho) thk. [Online].
http://www.thk.com/documents/mx_pdf/product/2009/DCatalogEspanol_04_SHS.pdf
- [26] Bansbach. (2011, Junho) Bansbach. [Online].
<http://www.bansbach.de/Konfigurator/en/gasfeder.html>
- [27] flexosprings. (2011, Junho) flexosprings. [Online]. <http://www.flexosprings.com/>
- [28] lesjoforsab. (2011, Junho) lesjoforsab. [Online].
http://catalog.lesjoforsab.com/pdf/en/chapters/104-105_EN.pdf
- [29] Martin Klein, *Introduccion en las normas DIN.*: Balzola, 1961.
- [30] fabory. (2011, Junho) fabory. [Online].
http://www.fabory.pt/pages/categories.html?catId=fabory_0000092195
- [31] e-boutet. (2011, Julho) e-boutet. [Online]. http://www.e-boutet.com/Upload/Produits_Photo/Ecrou_Molette_Large_Din_6303_en_acier_06012009130141.jpg
- [32] Rolmetais. (2011, Junho) Rolmetais. [Online]. <http://www.rolmetais.pt/PDF/FT01-W%2045.pdf>
- [33] kuka-robotics. [Online]. <http://www.kuka-robotics.com/en/>
- [34] ASB automation solutions, Proposta: Célula de Soldadura Robotizada para Frame da Porta das Torres Eólicas, Mar. 22, 2011.
- [35] promotech. (2011, Julho) promotech. [Online].
http://www.promotech.eu/products/index/show/welding_cutting%2Cmcm
- [36] skf. (2011, Junho) skf. [Online]. <http://www.skf.com/files/600570.pdf>

Anexos